

## 木星ヘクトメートル電波の放射起源に関する研究

著者	伊藤 智美
学位授与機関	Tohoku University
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/35088">http://hdl.handle.net/10097/35088</a>

修士論文

木星ヘクトメートル電波の放射起源に関する研究

東北大学大学院理学研究科

地球物理学専攻

伊藤 智美

(指導教員 三澤 浩昭 准教授)

平成 19 年



# 要旨

木星は磁気圏内に衛星イオの火山活動に起因する巨大なプラズマ源を持ち、また強い磁場を持ちつつ約 10 時間という高速で自転をしているために、太陽風と磁気圏との相互作用によるエネルギーに加えて、大規模な内部エネルギーも発生している。これらのエネルギーの発露の一つとして、極域を通る磁力線上から強力な非熱的電波を放射すると考えられている。この電波の中で、周波数が数 100 k Hz – 数 MHz 帯にあり、Cyclotron-Maser instability (CMI)により放射されていると考えられる木星ヘクトメートル電波 (HOM) について、その放射起源の観測的実証はなされていない。HOM の放射特性は、電波放射メカニズムに関わるとともに、伝搬域のプラズマ環境、また、電波発生域へのエネルギー供給過程をも反映する。そのために、HOM の放射特性の解明は、電波発生過程、木星磁気圏環境およびそのダイナミクスを知る上で重要な手がかりになるといえる。この観点により、本研究では木星近傍を航行した Galileo および Ulysses の 2 機の探査機がそれぞれ観測した波動データの解析を行い、発生に関わる放射特性を探った。また Ray tracing を用いて、観測結果を再現するような放射条件の絞り込みを行い、HOM の放射特性・起源の解明を試みた。

木星近傍 300R<sub>J</sub> 以内で広範囲の Local Time をカバーして航行していた Galileo の電波観測からは、HOM の放射強度の南北差や LT 依存性の情報が得られた。南北差については、規則性の乏しい年変動があるものの概して南半球で観測される成分が卓越する南北非対称性が認められた。一方 LT 依存性については、LT0 時方向に特に出現頻度が増加する特性が検出された。この LT 依存性は先行研究と比べてより広範な LT を対象としていたが、その他にも HOM の activity の時間変化と分離できている点、Galileo と木星の距離が近い場合に生じる HOM の伝搬特性に起因した強度減少現象と分離できている点でアドバンテージがあり、広範な LT に対するより明瞭な結果となった。

一方、 $-20^{\circ} < \text{木理緯度} < 75^{\circ}$  の広範囲の木理緯度をカバーしていた Ulysses の電波観測からは緯度依存性の情報が得られた。Ulysses の観測結果からは、HOM は中高緯度帯ではほとんど出現せず、赤道帯 ( $-10^{\circ} < \text{木理緯度} < 10^{\circ}$ ) に集中することが示され、その強度比は 100 倍以上になることが示された。

本研究ではこれらの観測事実に基づいて、HOM の放射起源を明らかにするために、Ray tracing を用いて考察を行った。Ray tracing の計算条件としては、周波数  $f=940\text{kHz}$  の HOM を想定し、放射条件に関する従来の研究を参考にして、電磁波モードとしては R-X モードとした。また、磁場モデルは VIP4 モデル

(*Connerney et al.*, [1998]), プラズマ密度モデルは *Divine and Garrett* [1983] を参照して用いた。一方、フリーパラメータとして、放射源の存在する磁力線を特定するための  $L$  値、放射 cone の開き角 (cone half-angle) である  $\beta$ 、磁力線上の放射位置を特定するための周波数  $f$  と R-X モードのカットオフ周波数  $f_{R-X}$  の比である  $f/f_{R-X}$  を設定した。これらのパラメータをそれぞれ  $8 \leq L \leq 20$ 、 $40^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 、 $1.000001 \leq f/f_{R-X} \leq 1.01$  の範囲で変化させて条件を設定し、放射源が経度方向に一様に分布しているとする仮定の下で放射させて計算を行った。

Ulysses/URAP のデータ解析から緯度依存性に対して Ray tracing を行った結果、放射源が経度方向に一様に分布しているという単純な仮定では本研究で得られた観測結果は説明されないことが明らかになった。そこで本研究では、Galileo の観測結果の考察から得られた放射源の LT 依存性に着目し、Ray tracing の計算で初期条件とした放射源を経度方向一様とした仮定に現実の放射とのずれがあると考え、放射源の非一様性に着目して解析を行った。

経度方向の放射源の非一様性について考えるにあたり、*Grodent et al.* [2003] により示された木星紫外線オーロラの発光強度の MLT 依存性と、Galileo の観測から明らかにされた HOM 放射源の LT 依存性も考慮して、HOM の放射源に経度方向の非一様を仮定し Ray tracing の再解析を行った。その結果、LT3~9h と LT17~23h 付近の HOM 放射源について、それ以外の放射源との強度比を 1/2 にすると、Galileo/PWS で観測された LT 依存性、及び、Ulysses/URAP で観測された緯度依存性を定性的に満たす可能性が示された。しかし、この場合でも、赤道域と高緯度域で観測された HOM の大きな強度比は説明できない。一つの解釈としては、Ray tracing の結果から、HOM は赤道から高緯度に限なく放射されていることが予想され、このために Ulysses では、HOM は背景雑音と分別されずに解析され、結果として赤道域と高緯度で大きな見掛けの強度比が生じたことが考えられる。

以上より、本研究では観測領域として緯度方向、経度方向を広くカバーしている Ulysses と Galileo の観測から、HOM 強度の顕著な緯度依存性、LT 依存性を明らかにした。さらに、Ray tracing 解析からこの特性の成因は放射源に LT 依存性があることによる可能性を示した。ただし、この解釈の成立条件として、Ulysses では HOM として分別されなかった赤道から高緯度で広く分布する弱い HOM の存在が予想された。

HOM の放射起源に関するこれらの解釈の妥当性を検証するには、Ulysses/URAP では成しえなかった、BG と自然電波の分別が将来の電波探査で行われることがまず期待される。また、Galileo では十分には成しえなかった、HOM 出現の距離依存性が生じないような距離 ( $R > 20R_j$ ) でのより広範な LT での HOM 出現特性の導出も期待される。このように、より有用なデータを取得

するさらなる観測が **HOM** の放射起源、さらには **HOM** の放射そのものをコントロールする木星磁気圏ダイナミクスの解明につながるものと考えられる。



# 目次

要旨.....	i
目次.....	v
第1章 序論.....	1
1.1 木星.....	1
1.2 木星電波.....	2
1.3 木星ヘクトメートル電波.....	5
1.3.1 偏波特性.....	5
1.3.2 CML 依存性と緯度依存性.....	5
1.3.3 lane 構造.....	7
1.3.4 太陽風との相関.....	9
1.3.5 HOM の発生メカニズム.....	11
1.4 本研究の目的.....	12
第2章 観測.....	13
2.1 装置.....	13
2.1.1 Galileo.....	13
2.1.2 Ulysses.....	14
2.1.3 Wind.....	15
2.2 解析期間.....	17
2.2.1 Galileo.....	17
2.2.2 Ulysses.....	18
2.2.3 Wind.....	20
2.3 データ補正.....	22
2.3.1 Galileo.....	22
2.3.2 Ulysses.....	22
2.3.3 Wind.....	23
第3章 観測結果.....	25
3.1 Galileo の統計解析.....	25
3.1.1 南北非対称性.....	25



3.1.2 Local Time 依存性.....	27
3.2 Ulysses の統計解析.....	32
3.2.1 背景雑音(BG)強度の見積もり.....	32
3.2.2 緯度依存性.....	35
3.3 考察.....	36
3.3.1 南北非対称性.....	36
3.3.2 LT 依存性.....	37
3.3.3 緯度依存性.....	39
<b>第4章 Ray tracing 解析.....</b>	<b>43</b>
4.1 計算方法.....	43
4.1.1 分散関係式を用いた Ray tracing の原理.....	43
4.1.2 モデル.....	46
4.1.3 計算条件.....	48
4.1.4 Ray tracing による強度.....	50
4.2 計算結果.....	51
4.2.1 $\beta$ の変化に対する放射特性変化.....	51
4.2.2 $L$ の値変化に対する放射特性変化.....	51
4.2.3 $f/f_{RX}$ 変化に対する放射特性変化.....	52
4.2.4 まとめ.....	56
<b>第5章 考察 : HOM の放射起源.....</b>	<b>59</b>
5.1 BG 強度の見積誤差による出現特性への影響.....	59
5.2 HOM 強度の時間変化による出現特性への影響.....	61
5.3 放射源の経度方向不均一による出現特性への影響.....	62
5.3.1 LT 依存性からの放射源の推定.....	62
5.3.2 CML 依存性.....	65
5.3.3 LT 依存性の再考・まとめ.....	68
5.4 経度方向の不均一性に基づく観測結果の解釈.....	68
5.4.1 木星オーロラとの比較.....	69
5.4.2 Ray tracing の再考察.....	70
5.4.3 強度.....	75
5.5 LT 依存性の意義.....	76
5.6 まとめと今後の課題.....	76
<b>第6章 結論.....</b>	<b>79</b>

謝辭.....	83
---------	----

参考文献.....	85
-----------	----



# 第1章 序論

## 1.1 木星

木星は太陽系で最大の惑星であり、その半径は地球の約 11 倍の  $71492\text{km}$  ( $=1R_J$ )、質量は地球の約  $3 \times 10^2$  倍の  $1.899 \times 10^{27}\text{kg}$  である。図 1.1 に木星と地球の磁気圏の比較を示す。木星は磁場が非常に強く、地球と比べて  $2 \times 10^4$  倍もの磁気モーメントをもつ。これらに加え、約 9 時間 55 分という高速で自転しているために、木星磁気圏は非常に活動的な磁気圏環境にある。また、磁軸は木星の自転軸に対して約  $10^\circ$  傾いている。この磁軸に固定された経度を磁気経度といい、一般にシステムⅢ経度という。そして、観測者に対面するシステムⅢ経度のことを Central Meridian Longitude(CML : 中央子午線経度)という。

このように地球とは異なった磁気圏環境であることに加え、木星は磁気圏内に衛星イオの火山活動に起因する卓越したプラズマ源を持っている。そのために、木星は地球のような太陽風と磁気圏の相互作用によるエネルギーのほかに、共回転からのプラズマの遅れに伴う大規模な内部エネルギーを発生している。これらのエネルギーの発露として、木星磁気圏内では様々な電磁現象が生じ、その 1 つとして、木星は極域を通る磁力線上から強力な非熱的電波を放射すると考えられている。この木星電波は、木星磁気圏、特に直接探査の困難な木星内部磁気圏のダイナミクスに関して重要な情報を含んでいると考えられる。

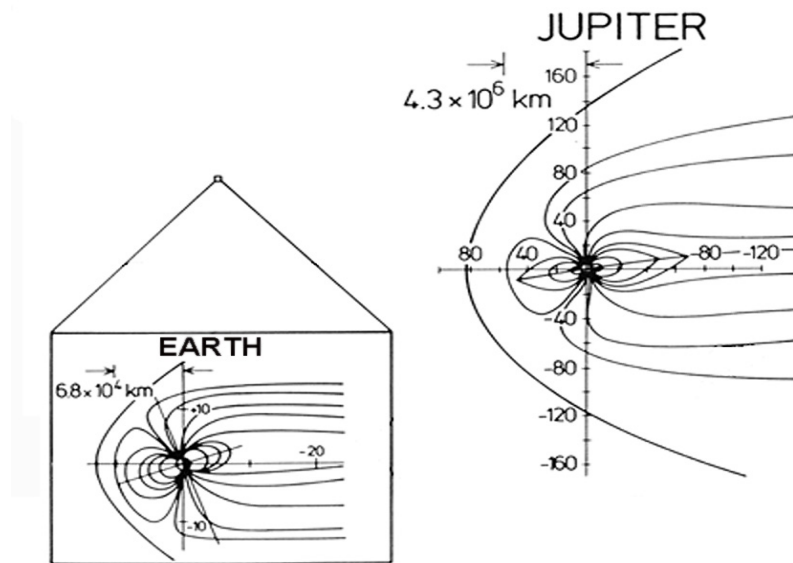


図 1.1 木星磁気圏と地球磁気圏の大きさの比較。

([http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/miscellaneous/planetary/other/impact/earth\\_jupiter\\_magnetosphere.jpg](http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/miscellaneous/planetary/other/impact/earth_jupiter_magnetosphere.jpg))

## 1.2 木星電波

第 1.1 節で木星からは様々な電波が放射されていることを述べた。図 1.2 に木星から放射される非熱的電波の電波強度と周波数の関係を示す。また、図 1.3 は 2000 年 9 月 18 日に Cassini 探査機で観測された木星電波をダイナミックスペクトルで示したものである。このように木星電波は、主に、波長によってデカメートル電波 (DAM)、ヘクトメートル電波 (HOM)、broad-band キロメートル電波 (b-KOM)、narrow-band キロメートル電波 (n-KOM) に分類される。この他に放射線帯相対論的電子により放射される木星シンクロトロン放射 (JSR) が知られている。

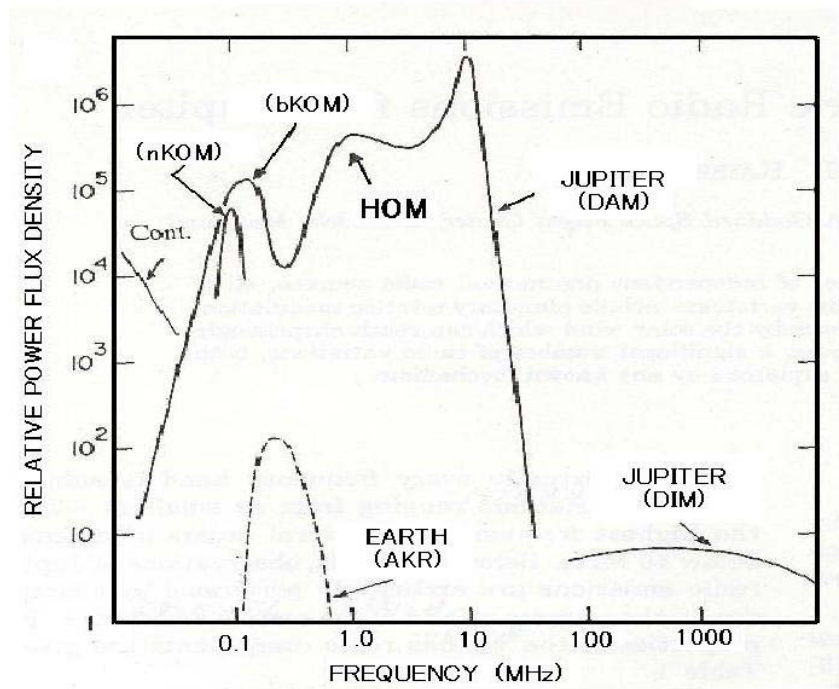


図 1.2 木星から発生する非熱的電波の周波数と強度の関係[Kaiser, 1993]。

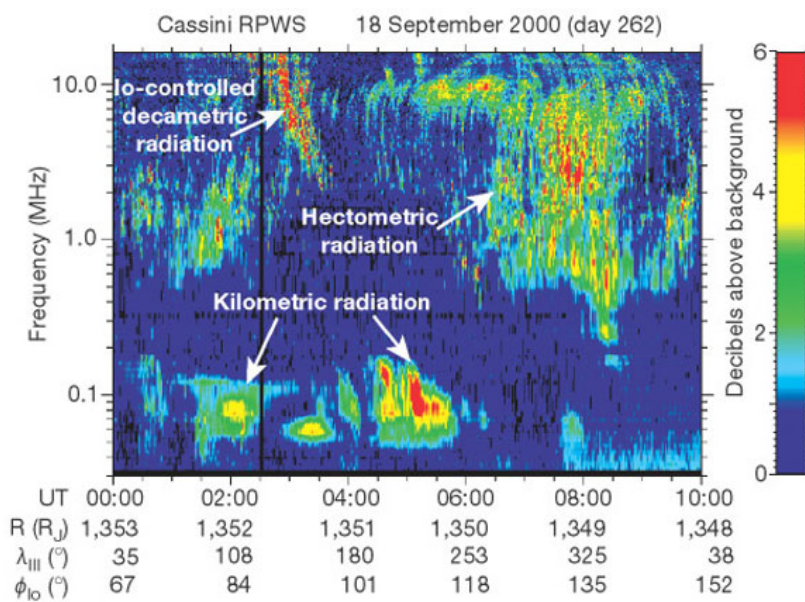


図 1.3 2000 年 9 月 18 日に Cassini によって観測された木星電波のダイナミックスペクトル。R は木星と Cassini の距離、 $\lambda_{III}$  は Cassini 探査機のシステム III 経度、 $\phi_{Io}$  は Io phase angle、カラーは強度を示す[Gurnett et al., 2002]。

DAM は 1955 年に地上観測によって発見された[Burke and Franklin, 1955] 木星電波の中でもっとも強度の強い電波である。DAM は木星の衛星 Io と関連のある Io-DAM と、関連のない non-Io-DAM に分けられる。Io-DAM は Io-phase angle と CML に依る出現特性を示す。近年では Io の他に木星の衛星である Calisto、Ganymede、Europa も DAM と相関があることが報告されている[Menietti et al., 1998; Menietti et al., 2001a; Higgins et al., 2006]。

DAM の発見後、1974 年に地球周回衛星 Radio Astronomy Explorer(RAE-1) や Interplanetary Monitoring Platform 6 (IMP-6)によって HOM が発見された[Brown, 1974; Desch and Carr, 1974; Kaiser, 1977]。HOM から下の周波数の木星電波は地球の電離層によって反射されてしまうために地上観測が困難であり、探査機による観測が主である。HOM の特性については次節で詳しく述べることとする。

1979 年に Voyager1 号、2 号によって b-KOM が発見され[Warwick et al., 1979]、また、b-KOM とは異なり、より狭帯域で放射しているキロメートル電波の n-KOM も発見された[Kaiser and Desch, 1980]。b-KOM は極域から放射されていると考えられているが、n-KOM は b-KOM と異なり、Io プラズマトーラス付近から放射されていると考えられている。図 1.4 にそれぞれの電波の予想される放射源位置を示す。

また、この他に、1958 年に周波数が数 10MHz—数 GHz 帯の JSR が発見された[Sloanaker, 1959]。これは放射線帯に捕捉されている相対論的電子によって放出されることが考えられている[e. g., Brice and McDonough, 1973]。

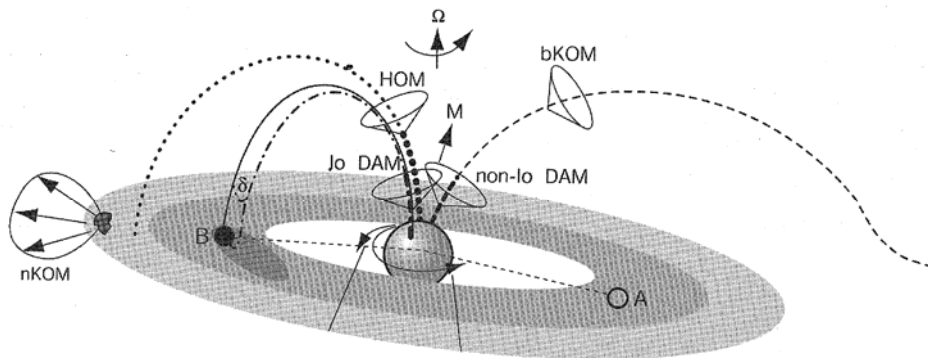


図 1.4 木星電波の放射の模式図。DAM、HOM、b-KOM はそれぞれ両半球から放射されていると考えられている[Zarka, 2000]。

本研究では周波数が数100kHz–数MHzで1MHz付近に強度のピークをもつHOMに注目した。

## 1.3 木星ヘクトメートル電波

### 1.3.1 偏波特性

Voyager探査機の観測により、赤道面において偏波成分を計測したときに、HOMには右回り、左回りの偏波が混在する複雑な特性があることが示されている。しかしながら、ほとんどの場合、北側の磁気緯度では右回りの円偏波が観測され、南側の磁気緯度で左回りの円偏波が観測された[Ladreiter and Leblanc, 1989; Ortega-Molina and Lecacheux, 1991]。このことからHOMはR-Xモードで放射された電波であると考えられている。その後、Voyager探査機の観測に加えて、Ulysses探査機の観測によっても同様の偏波特性が示された[Reiner, 1993b]。

### 1.3.2 CML 依存性と緯度依存性

HOMにはCMLに依る周期的な出現特性がある（図 1.5）。これはあるCMLでHOMの出現頻度が高くなるというものである。この特性は木星の磁軸が自転軸に対して傾いているために起きる特性として理解されている。また、Alexander *et al.* [1979]で示唆されている結果ではあるが、CML依存性とともな緯度依存性があることが言われている。図 1.6は横軸をCML、縦軸をWindの木理緯度としてHOMの出現強度を示したものである[Nakagawa, 2001]。出現強度の大きくなるCMLの値が木理緯度の違いで異なることがわかる。このCML依存性と緯度依存性を説明するものとして、latitudinal beaming modelというものが提唱されている[Ladreiter and Leblanc, 1989]。図 1.7(b)は、横軸をCML、縦軸を木星の磁気緯度で描いた図である。縦軸が磁気緯度で表示してあるために、探査機の木理緯度の変化がほとんどなくても、軌道がサインカーブとなる。図 1.7(b)において、水色の斜線部分が想定される電波の放射域を示すが、探査機が斜線部に入っているときのみHOMを観測することとなる。そのために、図 1.7(a)



で示すように、探査機は 2 つの CML 範囲で HOM を観測することとなる。また、図 1.7(a)において、木理緯度の違う Voyager1 号と Voyager2 号の観測結果を見ると、木理緯度の低い Voyager1 号の方が HOM を観測する 2 つの CML 範囲の値が互いに近づいていることがわかる。図 1.7(b)において、それぞれの軌道と斜線部の重なりを見ると、Voyager1 号の方が HOM を受信する CML 範囲の値が互いに近いことがわかる。よって、CML 依存性、緯度依存性ともに、latitudinal beaming model でよく説明されることがわかる。

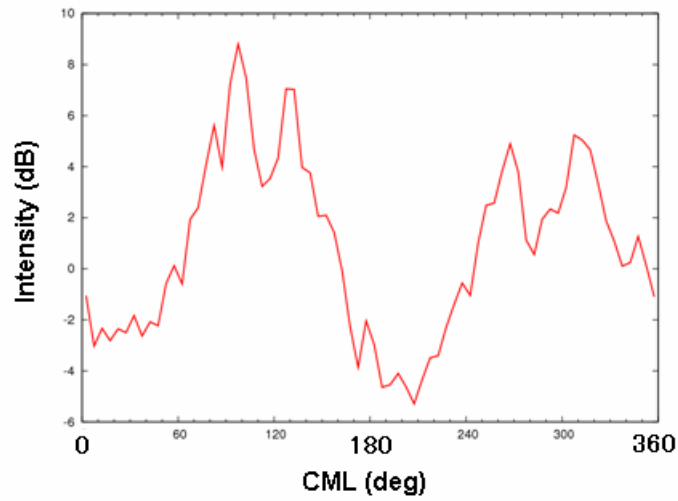


図 1.5 2001 年 1 月 2 日に Galileo 探査機で観測された HOM の CML に対する強度。

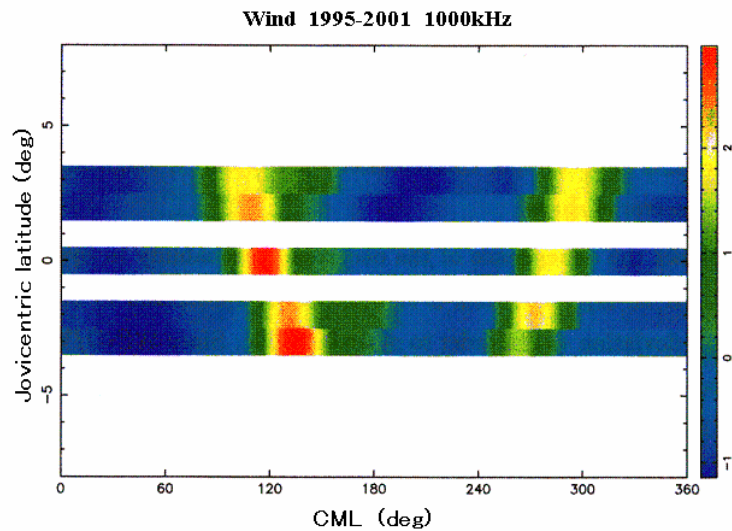


図 1.6 Wind 衛星で観測された HOM 強度の磁気緯度の変化に対する CML の変化。木理緯度が下がるにつれて、HOM 出現のローカルピークとなる 2 つの CML の値が近づくことがわかる[Nakagawa, 2001]。

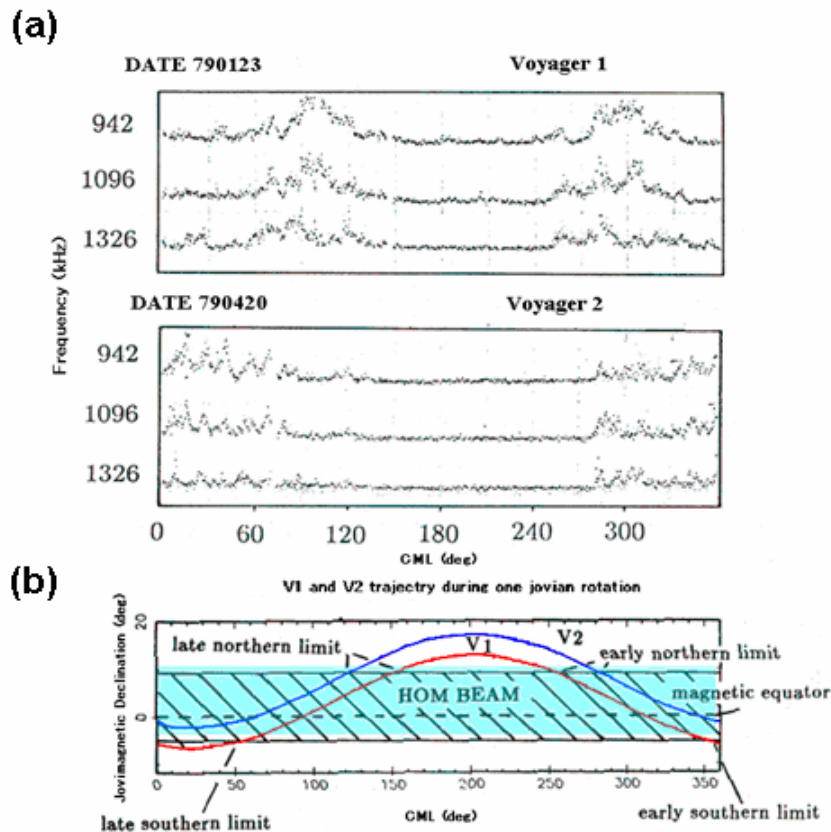


図 1.7 (a)Voyager1 号、Voyager2 号によって観測された HOM。(b)Latitudinal beaming model により予想される HOM の放射域（水色の斜線部分）と Voyager1 号、Voyager2 号の軌道[Ladreiter and Leblanc, 1989]。

### 1.3.3 lane 構造

HOMにはlane構造という特徴が知られている。これはあるCMLでHOMの強度が弱くなる現象で、横軸を時間、縦軸を周波数のダイナミックスペクトルで表したときに、広帯域に出現するHOMのスペクトルの中で強度が弱い周波数帯が連続して現われ、laneのように見える構造のことである。このlane構造はVoyager2 号の観測によって初めて発見された[Higgins *et al.*,1995]。その後、Galileo探査機の観測によってVoyager2 号で観測されたlane構造よりも高い周波数(1-3MHz)に出現する狭帯域の強度減衰周波数帯である、attenuation bandが発見された[Gurnett *et al.*, 1998] (図 1.8)。このattenuation bandの一部がlane構造であると考えられており、これら 2 つの現象は同じものとされている

[*Higgins et al.*, 2001]。Menietti *et al.* [2001b]はこれらの現象とIo火山活動との関連を示唆している。このことや、モデル計算[*Gurnett et al.*, 1998; *Higgins et al.*, 1999, 2001]の結果から、現在、このlane構造を作り出す要因はIo L-shellに依る散乱と考えられている[*Gurnett et al.*, 1998] (図 1.9)。

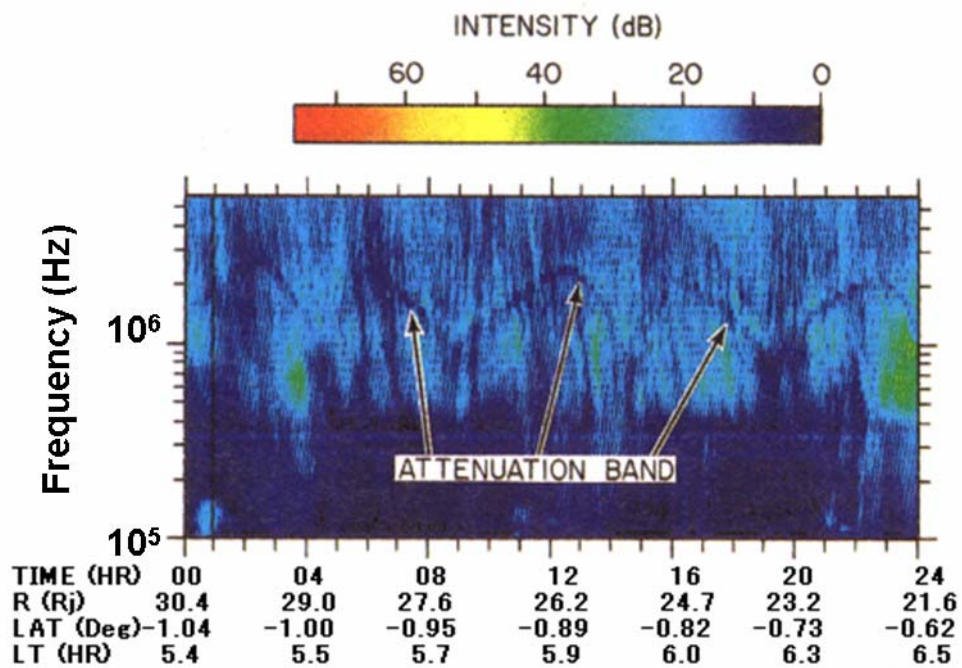


図 1.8 1997 年 5 月 6 日に Galileo 探査機で観測された attenuation band のスペクトル。R は木星と Galileo の距離、LAT は Galileo の木理緯度、LT は Local Time を示す。スペクトルに見られる強度の弱い構造が attenuation band の低周波成分=lane 構造である[*Gurnett et al.*, 1998]。

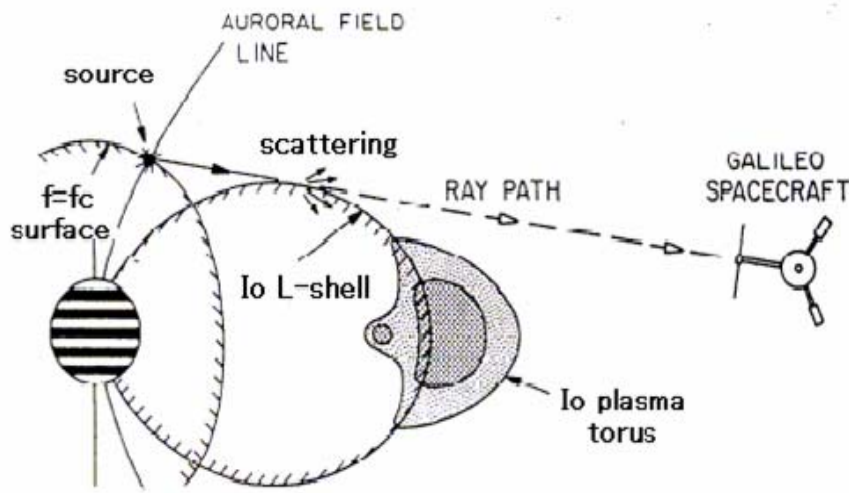


図 1.9 Io L-shell で散乱することによって、HOM の lane 構造が作り出される様子を示した模式図[Gurnett *et al.*, 1998]。

### 1.3.4 太陽風との相関

過去の研究より、HOMは太陽風の電子密度、動圧、エネルギーフラックスとの間に相関をもつといわれている[Desch and Barrow, 1984; Barrow and Desch, 1989; Rabl *et al.*, 1990]。Gurnett *et al.* [2002]では、CassiniとGalileoとの同時観測データを解析し、Cassiniで検出したinterplanetary shockがGalileoに到達したと思われる時間にHOMがactiveとなっていることを示した。より詳細には、太陽風のプラズマ密度の増加に伴い、HOMの強度が増加し、また、HOMの強度のピークとなっている時間と、オーロラの発光強度がピークとなっている時間がほぼ一致していることから、HOMとオーロラ、太陽風との間には正の相関があることが示唆された(図 1.10)。しかしながら、地球のAKRや土星のSKRと太陽風との相関と比べて、HOMの場合、相関係数は低い値となっている[Desch and Barrow, 1984; Gallagher and D'Angelo, 1981]。

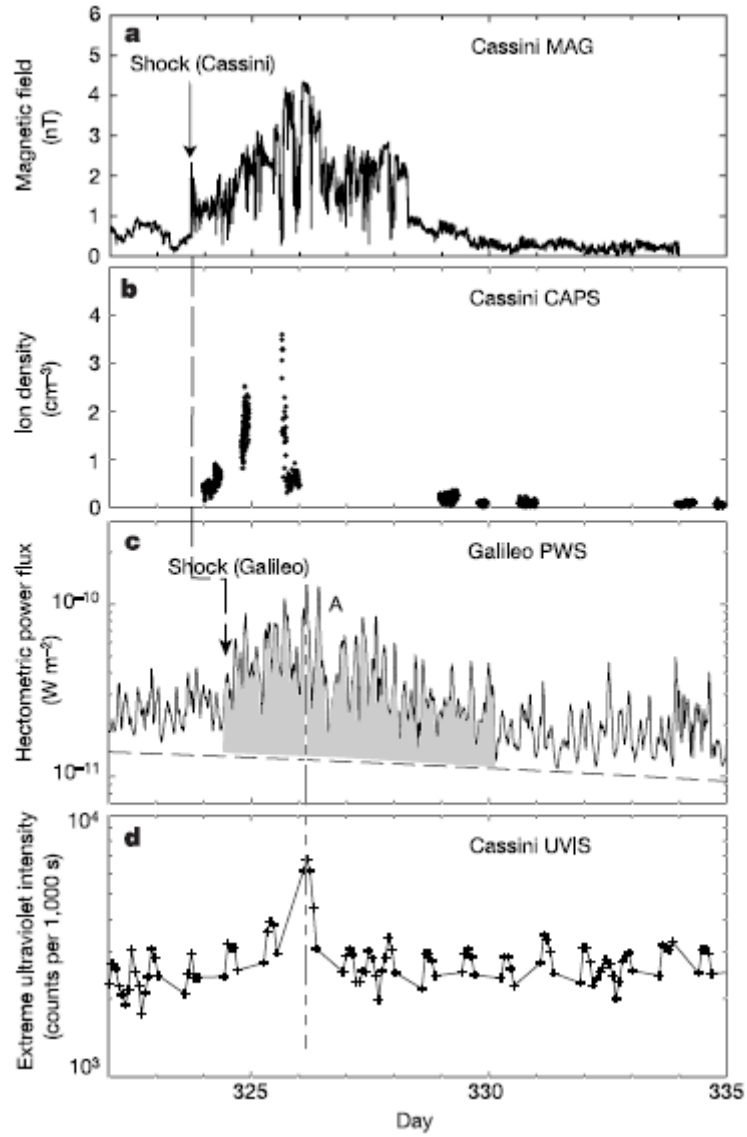


図 1.10 2000 年Day322–335 にCassiniとGalileoによって観測された太陽風と木星HOM、及び、UVオーロラの変動。(a)太陽風の磁場強度 (Cassini/MAG) (b)太陽風イオン密度 (Cassini/CAPS) (c)HOMの強度 (Galileo/PWS) (d)木星H<sub>2</sub>帯オーロラの発光強度 (Cassini/UVIS) [Gurnett *et al.*, 2002]

### 1.3.5 HOM の発生メカニズム

HOMの偏波特性でも述べたとおり、HOMはR-Xモードが卓越している電波であると考えられている。したがって、多くの惑星電波と同様に、HOMの発生メカニズムはCyclotron-Maser Instability (CMI)であると考えられている[Wu and Lee, 1979]。過去の研究より、HOMは $6 \leq L \leq 20$ の磁力線に沿って放射しているとされている[Ladreitner and Leblanc, 1990a, b; Reiner et al., 1993a, b; Ladreitner et al., 1994; Zarka et al., 2001]。図 1.11にCMIによって放射するHOMの模式図を示す。CMIでは、ある周波数の電波は、その場の電子サイクロトロン周波数がほぼ電波の周波数に等しいような低プラズマ密度域を放射域として発生するとされている。また、その領域を頂点として、その領域における磁力線との接線を軸とする空洞の円錐 (cone) に沿って放射するとされている。このconeの開き角をcone half-angle( $\beta$ )という。CMIでは電波は、その電波の周波数とカットオフ周波数が近い領域で発生するため、発生域近傍では少なからず屈折する。 $\beta$ は一般に、このようにlocalなプラズマ環境で電波が屈折した結果の値として与えられることが多い。また、HOMはR-Xモードが卓越して発生するとされているために、観測者(探査機)は、北半球から発生したHOMは磁力線と電波の伝播方向が一致しているため右回りの円偏波として、南半球から発生したHOMは磁力線と電波の伝播方向が逆になるため左回りの円偏波として観測することになる。

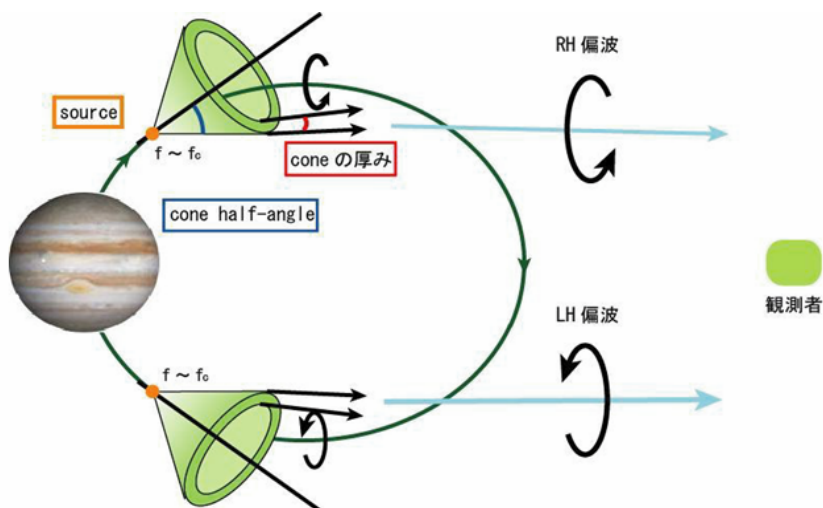


図 1.11 CMI によって発生する HOM の模式図。

## 1.4 本研究の目的

木星ヘクトメートル電波 (HOM) について、その放射起源の観測的実証はなされていない。1.1節でも述べたように、HOMの放射特性は、電波放射メカニズムに関わるとともに、伝搬域のプラズマ環境、また、電波発生域へのエネルギー供給過程をも反映する。そのために、HOMの放射特性の解明は、電波発生過程、木星磁気圏環境およびそのダイナミクスを知る上で重要な手がかりになるといえる。このような観点より、本研究では以下にあげる主に 2 つの点に着目して、HOMの放射起源の解明を試みた。

### (1) HOM の 3 次元的な放射特性

### (2) HOM の放射源の活動特性

これらの点に関して究明を進めるために、主に、木星探査機 Galileo、惑星間空間探査機 Ulysses の電波観測データを用いて解析を行い、HOM の 3 次元的な放射特性を求めるとともに、どのような放射条件で放射しているのかを探るために Ray tracing を用いた解析を行ない、HOM の放射起源の考察を行った。

本論文は以下の構成をとる。第 2 章では、本研究で解析に用いたデータの電波観測装置である木星探査機 Galileo/PWS、惑星間空間探査機 Ulysses/URAP、及び、人工衛星 Wind/WAVES の装置概要、観測データの特徴、及び、データの解析手法について述べる。第 3 章では Galileo/PWS、Ulysses/URAP で観測された HOM の解析結果を示し、3 次元的な出現特性をまとめる。第 4 章では Ray tracing を用いた HOM の出現特性の導出法を示すとともに、第 3 章で明らかにされた観測に基づく出現特性、特に Ulysses/URAP により得られた HOM 出現の緯度依存性との対応を示す。そして、第 5 章では、第 3 章、第 4 章での解析結果、及び、HOM 放射源活動度の非一様性も考慮した解析も加えた HOM 放射起源の検討結果を示すとともに、今後の研究課題についての考察も示す。最後に第 6 章で HOM の放射起源に関する本研究の結論を述べる。



## 第2章 観測

本研究では、木星探査機Galileo、惑星間空間探査機Ulysses、及び、人工衛星Windの電波観測データを用いた。本章ではこれらの飛翔体の観測装置、観測データ、及び、データの補正について述べる。

### 2.1 装置

#### 2.1.1 Galileo

Galileo (図 2.1) は 1989 年 10 月 18 日に打ち上げられ、1995 年 10 月に木星軌道に到達した木星探査機である。木星軌道到達後は木星の衛星を何度もfly-byしながら  $300R_J$  以内の木星近傍を周回した。2003 年 9 月 21 日に木星突入により mission を終了している。本研究においては波動観測装置である PWS (Plasma Wave Experiment) [Gurnett *et al.*, 1992] のデータを用いた。PWS は spin 軸に垂直かつ spin 面内で tip-to-tip が 6.6m のダイポールアンテナを用いて電界強度の観測を行った。観測周波数帯は 5.62Hz–5.65MHz で低、中、高の 3 つの周波数帯の装置からなり、低周波帯は 5.62Hz–31.1Hz、中周波数帯は 40kHz–160kHz、高周波数帯は 100kHz–5.65MHz をカバーしている。本研究では HOM の特性周波数帯を含む、高周波数帯のデータを用いた。周波数分解能に関しては 100.8kHz–5.645MHz を対数ステップで 42 チャンネルにとられている。また、時間分解能は 18.67 秒である (表 2.1)。なお、データは NASA の Planetary Data System で公開されているものを参照した。



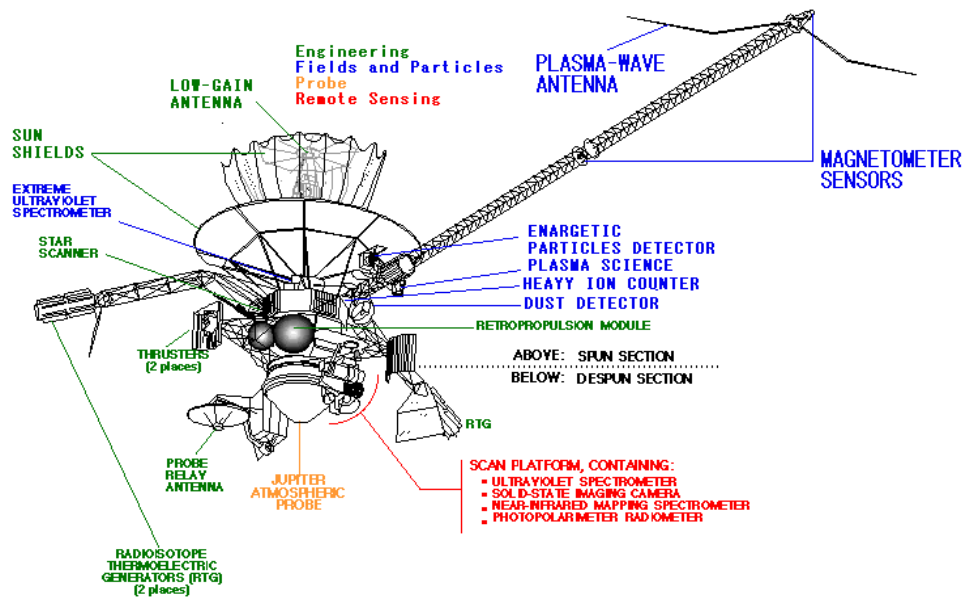


図 2.1 Galileo の装置図(<http://www.sondasespaciales.com/>)。

### 2.1.2 Ulysses

Ulysses (図 2.2) は 1990 年 10 月 6 日に打ち上げられた、太陽周回探査機であり、1992 年 2 月に木星 fly-by を行った。その後、黄道面を南側に離れ、黄道面に対して約  $80^\circ$  傾いた軌道面を航行している。本研究においては波動観測装置である URAP (Unified Radio & Plasma Wave Investigation) [Stone *et al.*, 1992] のデータを用いた。URAP は spin 軸に垂直で、tip-to-tip が 72.5m のダイポールアンテナと、spin 軸方向の 7.5m のモノポールアンテナで電界強度を観測している。観測周波数は 1.25kHz–940kHz で、低周波数帯と高周波数帯の装置からなり、低周波数帯は 1.25kHz–48.5kHz、高周波数帯は 52kHz–940kHz をカバーしている。本研究では高周波数帯のデータを用いた。周波数分解能に関しては 52kHz–940kHz を対数ステップで 12 チャンネルにとられている。また、時間分解能は 144 秒である (表 2.1)。なお、データは ESA の Ulysses Data System で公開されているものを参照した。

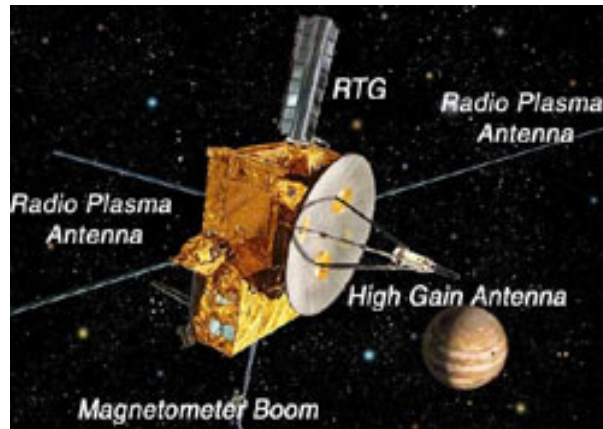


図 2.2 ULYSSES の装置図。(http://ulysses.jpl.nasa.gov/spacecraft/index.html)

### 2.1.3 Wind

Wind (図 2.3) は 1994 年 11 月 1 日に打ち上げられた、地球電離圏・磁気圏・太陽風を主な観測目的とする衛星であり、地球から  $5R_e \sim 250R_e$  付近を航行している。本研究においては波動観測装置である WAVES(Radio and Plasma Wave Investigation)[*Bougeret et al., 1995*]のデータを用いた。WAVESはspin軸に垂直な 2 組のダイポールアンテナ (tip-to-tip 50m, 7.5m) と、spin軸方向の 1 組のダイポールアンテナ (tip-to-tip 5.28m) で電界強度を観測している。観測周波数は  $20\text{kHz} - 13.825\text{MHz}$  で低周波数帯 (RAD1) と高周波数帯 (RAD2) に分かれており、RAD1 は  $20 - 1040\text{kHz}$ 、RAD2 は  $1.075\text{MHz} - 13.825\text{MHz}$  をカバーする。本研究は RAD1 のデータを用いている。周波数分解能に関しては  $20\text{kHz} - 1040\text{kHz}$  を実数ステップで 256 チャンネルにとられている。本研究で用いたデータの時間分解能は 60 秒である (表 2.1)。なお、データは NASA/GFSC の WAVES チームにより公開されているものを参照した。

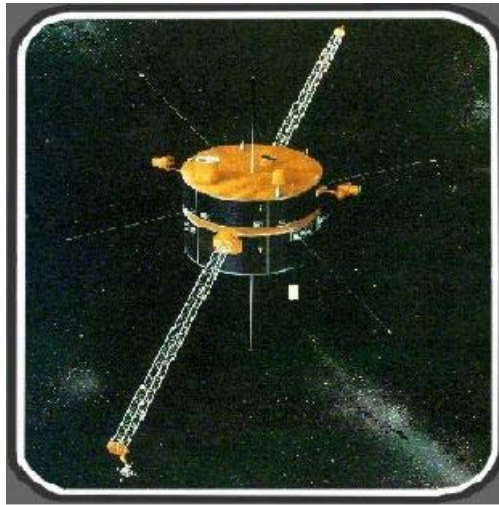


図 2.3 Wind の装置図。(http://pwg.gsfc.nasa.gov/wind.shtml)

表 2.1 Galileo、Ulysses、Wind の波動観測装置の仕様。

	Galileo/PWS	Ulysses/URAP	Wind/WAVES
時間分解能	18.67 秒	144 秒	60 秒
観測周波数	100.8kHz–5.645MHz	52kHz–940kHz	20kHz–1040kHz
周波数分解能	$\left[ \log_{10}(5645000) - \log_{10}(100800) \right] / 42$	$\left[ \log_{10}(940) - \log_{10}(52) \right] / 12$	4kHz
アンテナ	<ul style="list-style-type: none"> <li>tip-to-tip 6.6m のダイポールアンテナ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>tip-to-tip 72.5m のダイポールアンテナ</li> <li>7.5m のモノポールアンテナ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>tip-to-tip 50m のダイポールアンテナ(<math>E_x</math>)</li> <li>tip-to-tip 7.5m のダイポールアンテナ(<math>E_y</math>)</li> <li>tip-to-tip 5.28m のダイポールアンテナ(<math>E_z</math>)</li> </ul>
感度	$15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @10kHz	$10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @100kHz	$7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
特徴	木星周回探査機	黄道面を離れた軌道面を持つ太陽周回探査機	地球周回衛星

## 2.2 解析期間

### 2.2.1 Galileo

Galileo/PWSで取得されたデータの解析期間は1996年6月–2002年1月とした。この期間はGalileoが木星軌道に到達してからmission終了までの大部分の期間に相当する。この期間、Galileoは木星から $300R_j$ 以内のほぼ赤道面内を航行し、Local Time(LT)は反時計回りに5hから13hまでの軌道をとった。図2.4に解析期間中のGalileoの軌道パラメータ(LT、木理緯度、木星からの距離)を、図2.5に軌道図を示す。また、表2.2には、解析期間中の軌道パラメータの範囲を示す。

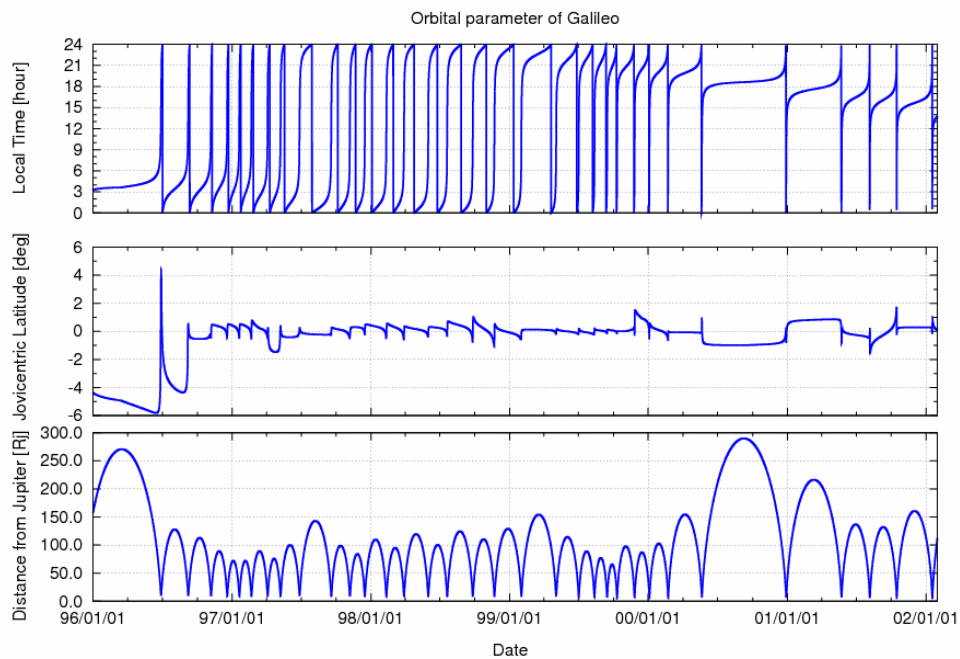


図 2.4 解析期間のGalileoの軌道パラメータ。横軸は時間を表す。上段：Local Time[hour]。中段：木理緯度[deg]。下段：木星とGalileoの距離[ $R_j$ ]。

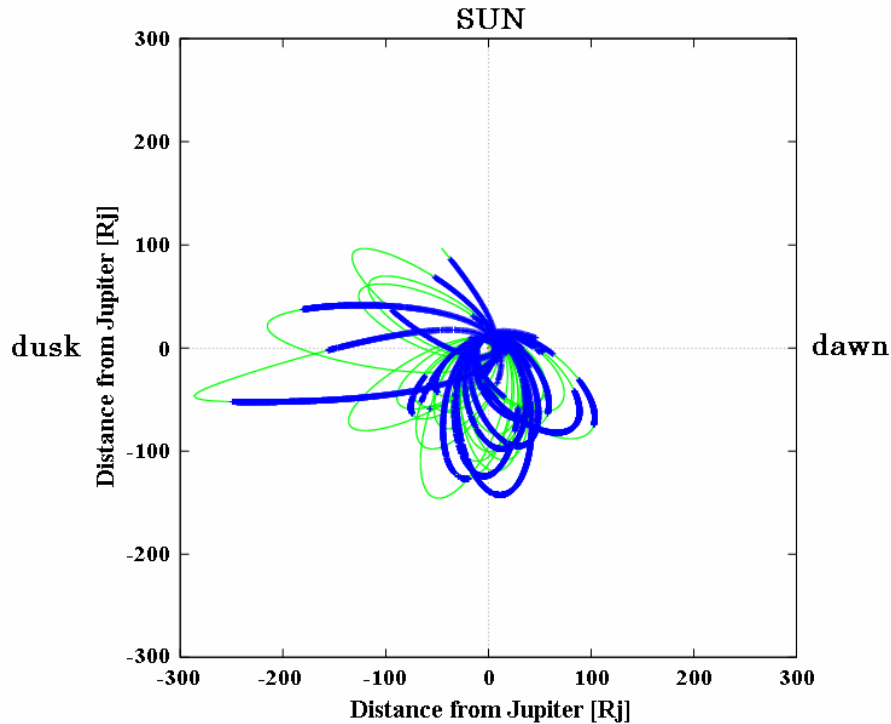


図 2.5 1996 年–2002 年の Galileo の軌道。木星を北から見下ろした図。上が太陽方向。緑の線は Galileo の軌道で、青の太線はデータがある部分である。

## 2.2.2 Ulysses

Ulysses/URAPで取得されたデータの解析期間は2003年9月–2004年10月とした。この期間はUlyssesの木理緯度変化が $-20^{\circ}$  ~  $+80^{\circ}$  とUlyssesの全観測期間を通じて最も大きく変化しており、なおかつ木星とUlyssesの距離が1AU以内と近い期間である。広範囲の緯度変化を解析できる点と、木星電波を良好なS/Nで観測できる距離にUlyssesが航行していることから、解析に適している期間といえる。図 2.6に解析期間中のUlyssesの軌道パラメータ(LT、木理緯度、木星との距離)を、図 2.7に軌道図を示す。また、表 2.2には、解析期間中の軌道パラメータの範囲を示す。

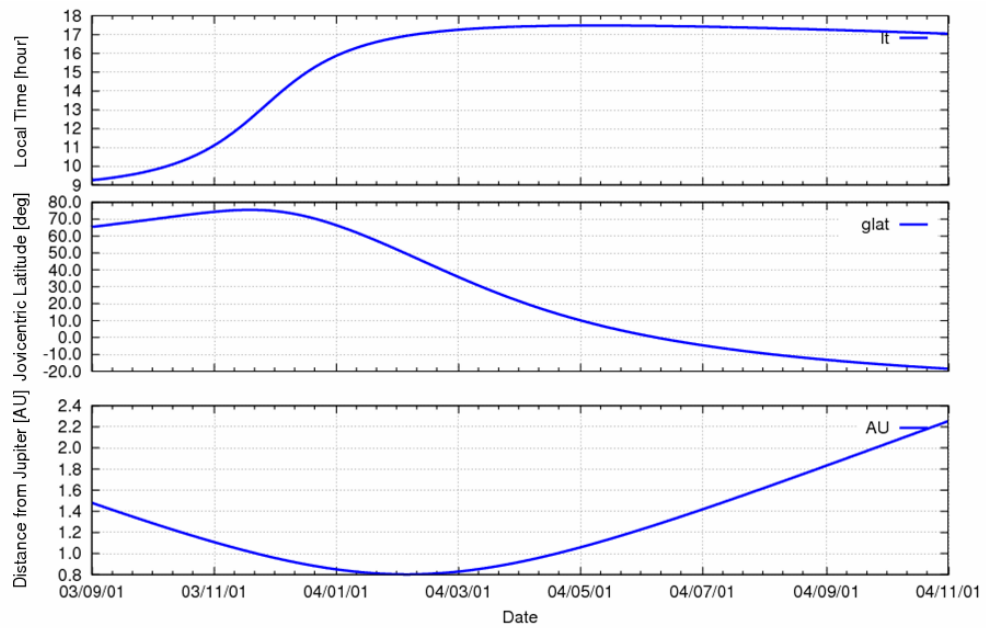


図 2.6 解析期間の Ulysses の軌道パラメータ。横軸は時間を表す。上段:Local Time[hour]。中段:木理緯度[deg]。下段:木星と Ulysses の距離[AU]。

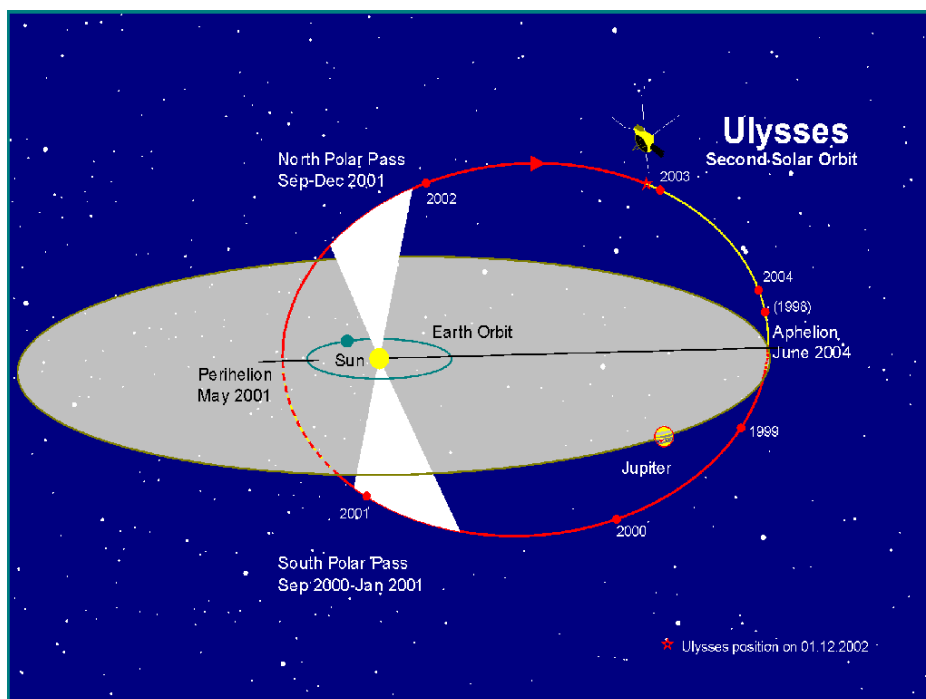


図 2.7 1998 年－2004 年の Ulysses の軌道(<http://helio.esa.int/Ulysses/archive>)。

### 2.2.3 Wind

Wind//WAVESのデータはGalileo/PWSのデータとの強度の対応をとるために用いた。このためデータの解析期間はGalileo/PWSのデータの解析期間とほぼ同じ1996年1月–2001年12月とした。また、Windは地球から高々0.01AU程度しか離れていないため、木星からは地球とほぼ同位置に見えるので、Windの位置は地球の位置と同じとして扱った。よって軌道パラメータはすべて地球と同じ値として計算した。この期間、WindのLTは11-13[hour]とGalileoに比べてあまり変化していない。このLTがほぼ一定の方向からモニターしたことを利用して、Windのデータを木星自体のactivityの変化のリファレンスとして扱うことができる。図2.8に解析期間中のWindの軌道パラメータ（LT、木理緯度、木星との距離）を、図2.9に軌道例を示す。また、表2.2には、解析期間中の軌道パラメータの範囲を示す。

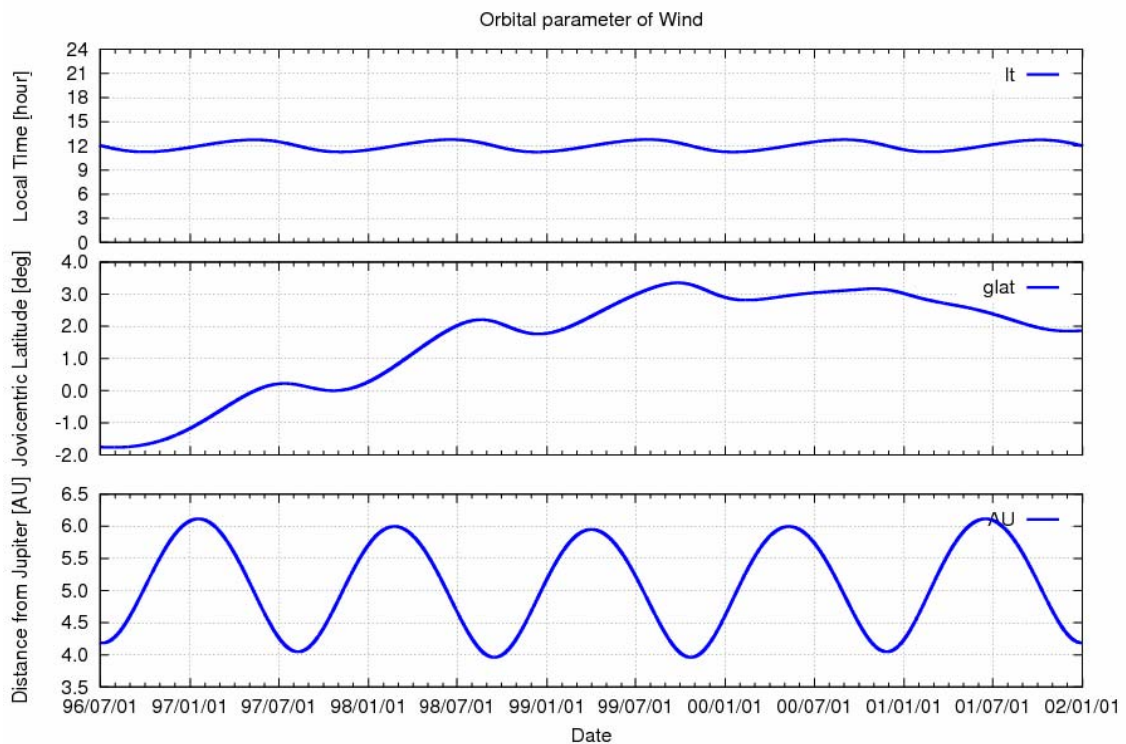


図 2.8 解析期間の Wind の軌道パラメータ。横軸は時間を表す。上段:Local Time[hour]。中段:木理緯度[deg]。下段:木星と Wind の距離[AU]。



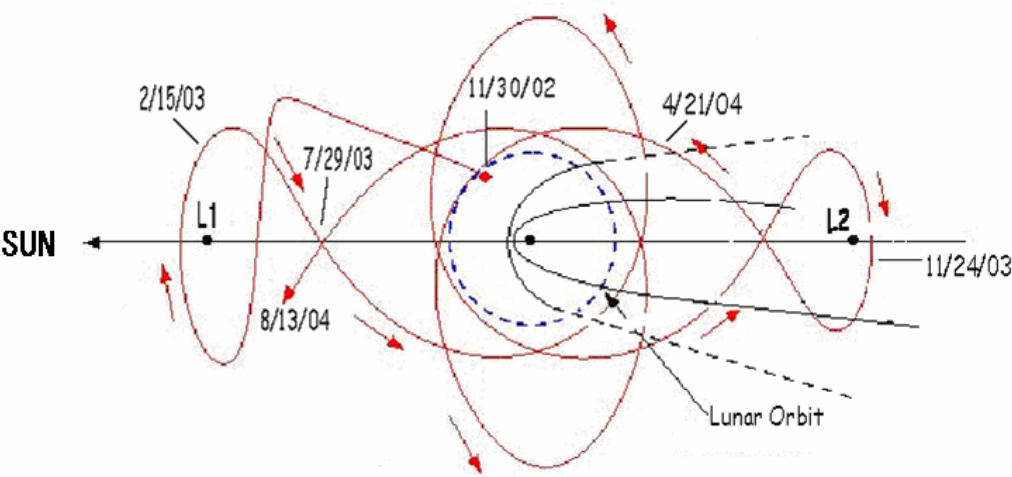


図 2.9 Wind の軌道例(<http://pwg.gsfc.nasa.gov/>)。

表 2.2 解析期間における Galileo、Ulysses、Wind の木星との距離、LT、木理緯度の範囲。

	Galileo	Ulysses	Wind
解析期間	1996 年 6 月－ 2002 年 1 月	2003 年 9 月－ 2004 年 10 月	1996 年 1 月－ 2001 年 12 月
木星との距離	10-300 [R <sub>J</sub> ]	0.8-2.25 [AU]	4-6 [AU]
Local Time	5-13 [hour]	9-17 [hour]	11-13 [hour]
木理緯度	-2° ~2°	-20° ~80°	-2° ~3°



## 2.3 データ補正

### 2.3.1 Galileo

本研究では HOM の強度が概して最も強い 1.01MHz のデータを使用した。そのデータから Back Ground(BG : 銀河背景放射、受信機雑音による強度)を差し引き HOM の強度を導出し、さらに木星から 50R<sub>j</sub> における強度に強度補正を行った。Galileo/PWS のデータは電界強度で公開されている。その結果、強度は距離に反比例するため、HOM の強度は

$$I_{HOM} = (I_{obs} - I_{BG}) \times \left( \frac{R_G}{50} \right) \quad (2.1)$$

によって求められる。I<sub>HOM</sub>はHOMそのものの強度[V/√Hz]、I<sub>obs</sub>は観測値[V/√Hz]、I<sub>BG</sub>はBG強度[V/√Hz]、R<sub>G</sub>は木星とGalileoの距離[R<sub>j</sub>]を示す。

### 2.3.2 Ulysses

本研究では Ulysses/URAP の最高計測周波数である 940kHz のデータを使用した。太陽周回探査機である Ulysses のデータでは太陽電波である強度の大きい typeⅢバーストがしばしば受信される。typeⅢバーストは特徴的なスペクトル形状を示すために、容易に HOM と分別できる、このことを利用して、HOM の導出のために、typeⅢバーストを同定し、生のデータから差し引き、Galileo/PWS のデータ解析同様に、BG 強度を差し引くとともに、1AU における強度に強度補正した。Galileo 同様、Ulysses/URAP のデータも電界強度で公開されている。その結果、強度は距離に反比例するため、HOM の強度は

$$I_{HOM} = (I_{obs} - I_{BG}) \times \left( \frac{R_U}{1} \right) \quad (2.2)$$

によって求められる。I<sub>HOM</sub>はHOMそのものの強度[μV/√Hz]、I<sub>obs</sub>は観測値[μV/√Hz]、I<sub>BG</sub>はBG強度[μV/√Hz]、R<sub>U</sub>は木星とUlyssesの距離[AU]を示す。

### 2.3.3 Wind

本研究で用いた Wind/WAVES のデータは Galileo/PWS とのデータ比較を行うため、Galileo/PWS のデータ解析同様に、HOM の強度が最も強い 1MHz の周波数帯を選択した。解析では Ulysses/URAP の解析と同様に、まず、データから太陽電波である typeIII バーストを同定し差し引く。Wind/WAVES は BG 強度との相対強度でデータが与えられているので、データに BG 強度を掛け、その値から BG 強度を引いたものが電波現象の強度となる。この値を 1AU における強度に強度補正した。Galileo、Ulysses と同様に、Wind/WAVES のデータも電界強度で公開されている。その結果、強度は距離に反比例するため、HOM の強度は

$$I_{HOM} = (I_{obs} \times I_{BG} - I_{BG}) \times \left( \frac{R_W}{1} \right) \quad (2.3)$$

によって求められる。 $I_{HOM}$ はHOMそのものの強度[ $\mu \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]、 $I_{obs}$ は観測値[ $\mu \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]、 $I_{BG}$ はBG強度[ $\mu \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]、 $R_W$ は木星とWindの距離[AU]を示す。



## 第3章 観測結果

本章ではGalileo/PWSとUlysses/URAPによって観測されたデータの解析結果について述べる。

### 3.1 Galileoの統計解析

本節ではGalileo/PWSによって観測されたデータの解析結果について述べる。2章でも述べたように、Galileoは解析期間中、木星から  $300R_J$  以内を周回していた。そのために、Galileo/PWSのデータからは、他の探査機と比べて、より微弱なHOMに関する情報が得られるとともに、放射強度の南北差や、Local Time 依存性の情報が得られる。

#### 3.1.1 南北非対称性

本研究ではGalileoが木星から  $20R_J$  以内の距離を航行していた時のデータを用いて、HOM強度の南北依存性を調べた。

図 3.1はGalileoの木星の磁気緯度に対する 1MHzのHOMの強度を示したものである。木星のごく近傍で観測されたデータであるために電波発生域に近く、磁気緯度が+では北半球起源の電波が、磁気緯度が-では南半球起源の電波が卓越して観測されたと考えられる。そのことを考慮すると、図 3.1より北半球起源、南半球起源それぞれの電波の強度差を読み取ることができる。

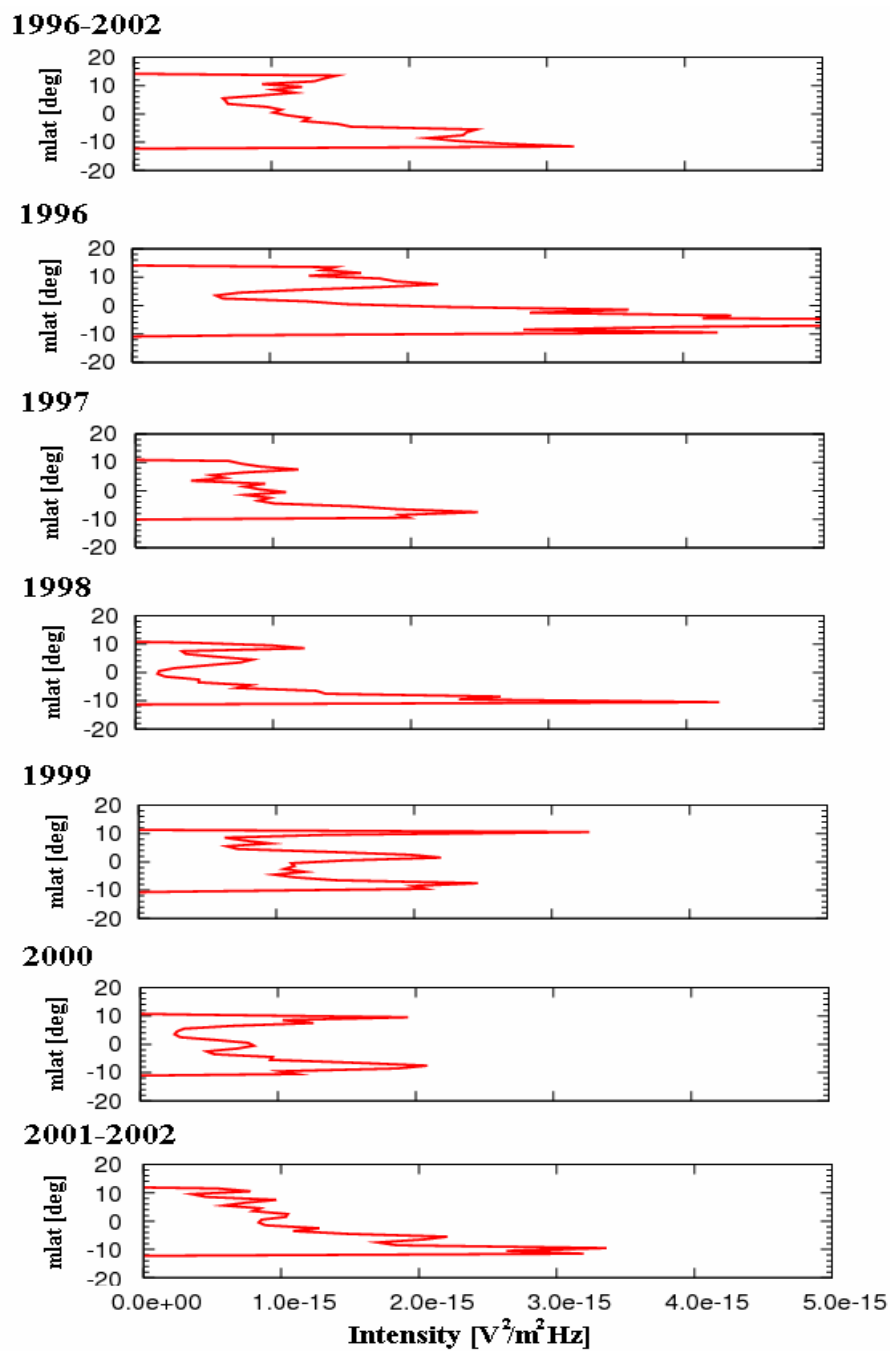


図 3.1 Galileo/PWS によって観測された 1MHz HOM 強度の木星の磁気緯度依存性。木星から 20R<sub>J</sub> 以内で観測された HOM 強度の平均値である。上から観測期間中すべての平均値、1996 年～2000 年は 1 年ごとの平均値、一番下のグラフは 2002 年が 1 ヶ月分のデータのみであるために 2001 年と 2002 年を合わせた平均値である。

1999 年、2000 年は南北での強度差はほとんどないが、1996 年～1998 年、2001 年、2002 年は南半球起源の電波が強い様相が見てとれる。また、1996 年～2002 年に Galileo/PWS で観測された全データを用いて、1MHz における HOM 強度を木星の磁気緯度と、Galileo の木星からの距離に対して示したものが図 3.2 である。木星近傍においては、HOM の分布が赤道面に集中していないことがわかる。図 3.1 において、どの年も磁気赤道付近で強度が弱くなっているのは、図 3.2 に示したように、Galileo が木星から  $20R_J$  以内とごく近傍であるために、まだ電波が赤道面に集中していないからと考えられる。

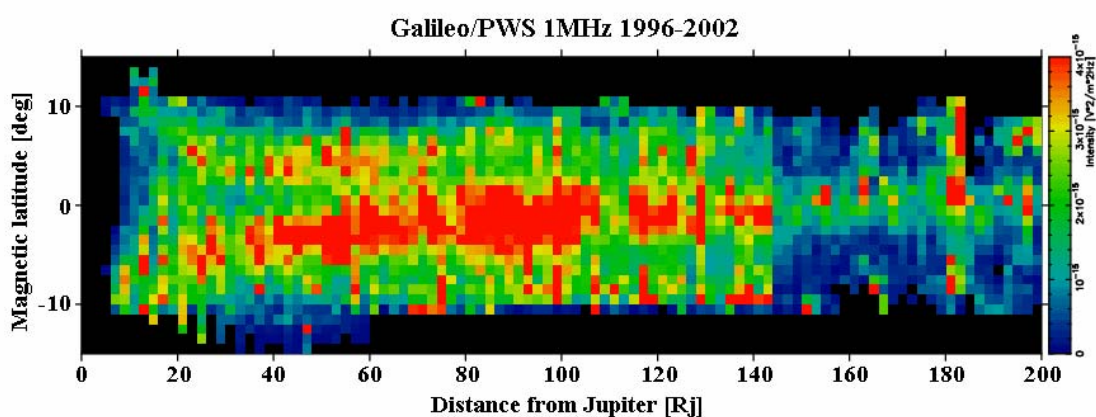


図 3.2 Galileo/PWS によって観測された 1MHz における HOM 強度の、木星磁気緯度と Galileo の木星からの距離に対するカラーマップ。

### 3.1.2 Local Time 依存性

本研究では、Galileo のもう一つの特徴である、航行軌道が Local Time (LT) を広範囲でカバーしていたことを用いて、HOM の LT 依存性についての解析を行った。

*Menietti et al.* [1999] によって、Galileo/PWS のデータを用いた HOM 強度の LT 依存性が報告された。図 3.3 に *Menietti et al.* [1999] の結果を示す。この結果より、LT 20h～4h で強度が強くなっていることがわかる。しかしながら *Menietti et al.* [1999] の解析期間の Galileo の軌道 (図 3.4) は限られた LT、及び、木星距離に対する結果であった。図 3.3 で、強度が弱い LT では Galileo の軌道が近木点

付近となっていた時のデータが多くを占めている。このことから、この解析期間中Galileoはほぼ赤道面内を航行していたことを考慮すると、強度が弱いとされたLTでは、木星から  $20R_J$  以内の電波が到達しにくく、弱く観測される距離、及び、緯度依存性が見えていたことが考えられる。このことより、本研究ではGalileoが木星軌道に到達してから、mission終了までの大部分のデータを用いて解析を行い、距離依存性に留意してLT依存性の解析を行った。

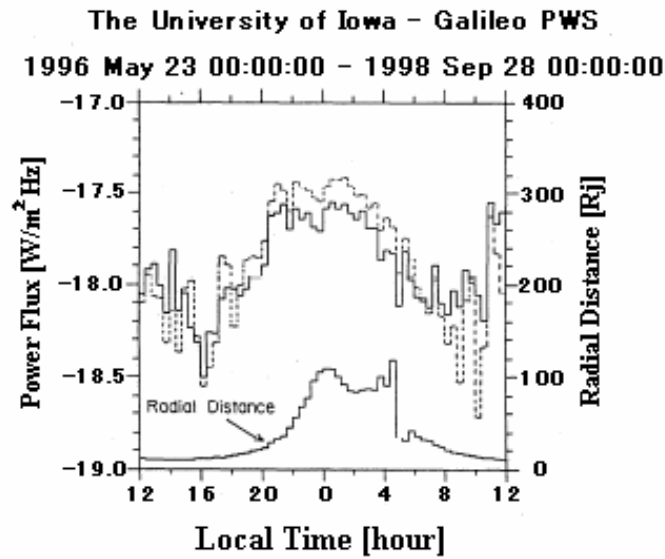


図 3.3 1996 年 5 月 23 日から 1998 年 9 月 28 日にGalileo/PWSで観測されたLTに対する 302.4kHz～2822kHzのHOMの平均強度。左縦軸がpower flux[W/m<sup>2</sup>Hz]で、右縦軸が木星からの距離[R<sub>J</sub>]、横軸がLocal Time[hour]を表す。3 種ある線のうち、上側に示された実線と破線がpower fluxであり、破線は磁気緯度を $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$  に制限した際に得られたものである。下側に示されている実線は木星からの距離を示す[Menietti et al., 1999]。

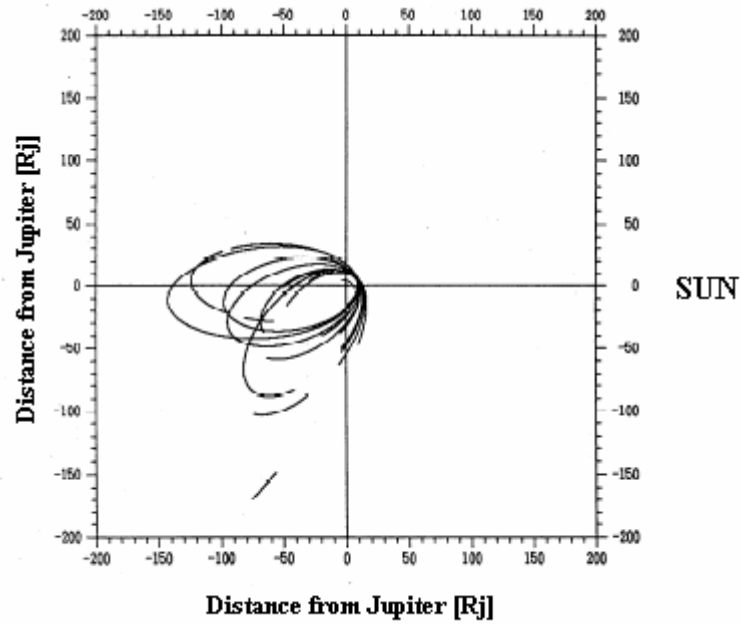


図 3.4 1995 年から 1998 年までの Galileo の軌道。中心が木星で、木星を北から見下ろした図である。右側が太陽方向である[*Menietti et al.*, 1999]。

図 3.5は本研究で解析を行った期間のGalileoの軌道図である。青の太線がデータのある期間である。この期間もGalileoはほぼ赤道面内を航行していたので、木星のごく近傍では電波が観測者に届きにくいということを考慮して、ここで扱うデータは、木星から 20Rj以上の距離を航行していたときに観測されたデータを用いた。この条件を満たすデータについてLTごとのデータ数を示したものが図 3.6である。朝側から昼にかけてのデータがほとんどないものの、木星近傍のデータを除いても、カバーできたLTが*Menietti et al.* [1999]の研究と比べて増えていることがわかる。図 3.7は図 3.5で示されたGalileoの赤道面内の軌道上に強度をプロットしたものである。一つのbinは  $10R_j \times 10R_j$  とした。*Menietti et al.* [1999]の結果と同様に、夜中側で強度が強くなっていることがわかる。また、夕方側から夜にかけては強度が弱くなる一方で、LT12h~13hは強度が強くなっていることがわかる。ここで、LT12h~13hで強度が強くなっていることに関しては、データ数が少ないため、突発的な強度の強い現象の影響を受けた可能性も否定はできない。LT依存性については第3.3節でさらに議論する。



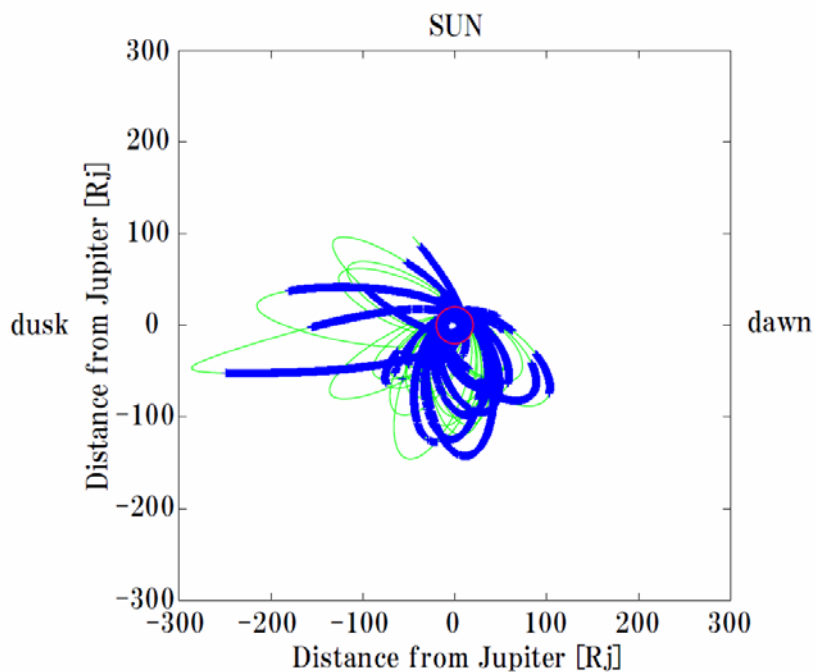


図 3.5 1996–2002 年の Galileo の軌道。木星を北から見下ろした図。上が太陽方向。緑の線は Galileo の軌道、青の太線はデータがある部分を示す。赤線は木星から  $20R_j$  を示す。

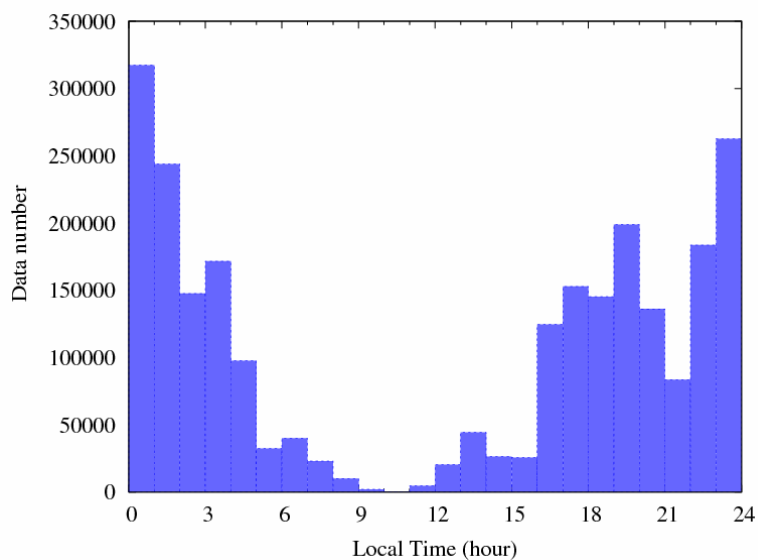


図 3.6 解析期間中の Galileo/PWS の Local Time に対するデータ数。データ点一つは 18.67 秒毎に得られた観測点一つに相当する。なお、データはすべて Galileo が木星から  $20R_j$  以上の距離のときに観測したものに制限している。

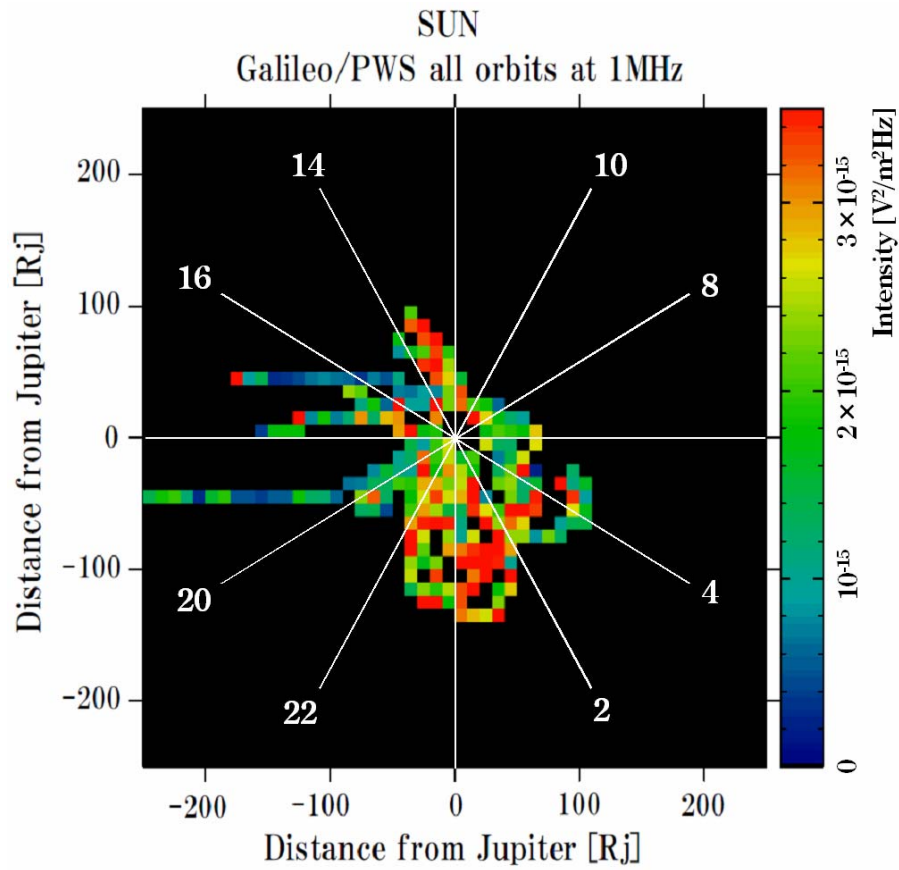


図 3.7 1996 年–2002 年にGalileo/PWSで観測された 1MHzのHOMの強度。Galileoの軌道上にプロットしてある。カラーは強度 $[V^2/m^2Hz]$ を示す。図 3.5と同様に木星を北から見下ろした図として示しており、白字の数字はLTを表す。

## 3.2 Ulysses の統計解析

本節では Ulysses/URAP によって観測されたデータの解析手法の詳細と解析結果について述べる。

### 3.2.1 背景雑音(BG)強度の見積もり

第 2 章で述べたように、解析で使うデータはBG強度を差し引き、強度補正を行っている。しかしながら、Ulyssesのデータの場合、Wind/WAVESのデータのようにBG強度が既知として与えられていない、かつ、Ulyssesが木星赤道面付近を航行しているとき以外の強度が弱いという 2 点から、BG強度を決めることが容易ではない。さらに、Ulysses/URAPのデータはtelemetryのbit rateの違い（表 3.1）により観測した電界強度に違いがあることも示されている。なお、ほとんどの観測データはmode3、または、mode4 で送信されている。図 3.8に mode3 と mode4 で電界強度の差異が顕著な例を示す。赤色のプロットがmode3、緑色のプロットがmode4 のとき観測された電界強度である。このことから、どのデータも一律にBG強度を差し引くのではなく、modeごとにBG強度を差し引く必要がある。

表 3.1 Ulysses/URAP の telemetry のモードと bit rate の関係。

モード	bit rate
mode1	128 bps
mode2	256bps
mode3	512 bps
mode4	1024bps

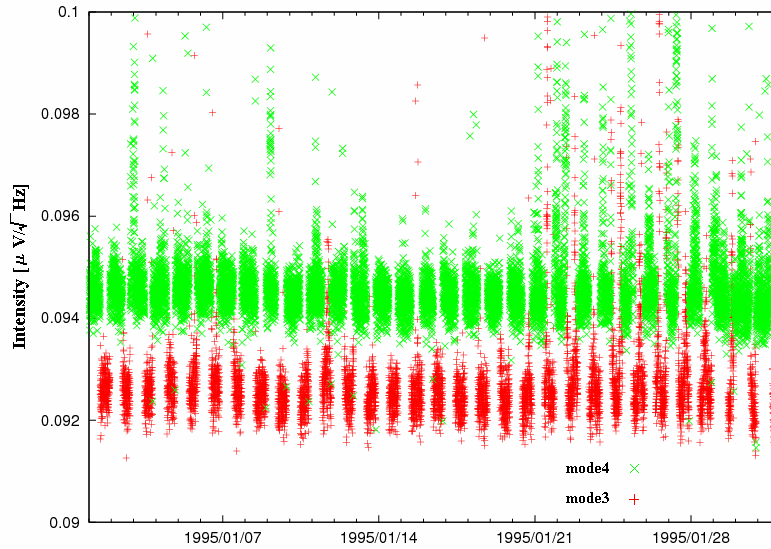


図 3.8 1995 年 1 月に Ulysses/URAP で観測された電界強度。強度補正をせず、生のデータをプロットしてある。赤色のプロットが mode3、緑色のプロットが mode4 のときに観測された電界強度を示す。

本節のはじめに述べたように、Ulyssesが木星赤道面付近を航行していたときと、高緯度付近を航行していたときでは観測された電界強度に大きな差がある。図 3.9と図 3.10それぞれに、Ulyssesが赤道面付近を航行していたときと、高緯度付近を航行していたときに観測された電界強度を示す。図 3.10の電界強度の範囲は図 3.9の下辺から青線までの範囲に相当する。図 3.9を図 3.10と同じ表示範囲で示したものが図 3.11である。図 3.10、図 3.11ともに、電界強度の下へりがわずかではあるが変動していることがわかる。これをBG強度そのものの変動と仮定し、ある期間ごとにBG強度を一定値として差し引いて強度補正を行っている。そのために、この変動が図 3.9のようにUlyssesが赤道面付近を航行しており、電界強度がBGの変動幅に対して十分強いときは、強度補正結果にBGの変動幅の影響はほとんどない。しかし、図 3.10のようなUlyssesが高緯度付近を航行しており、電界強度が微弱なときは、BGの変動幅の影響が生じる可能性は否定できない。

BG強度の変動は主に受信機雑音の変動によってもたらされていると考えられるが、URAPには受信機雑音のみを求めるための機能は備わっていないので、厳密にBG強度を決めることはできない。そこで本研究では、解析に用いた期間（2003 年 9 月～2004 年 10 月）のBG強度の変動幅である約  $2 \times 10^{-6} [\mu \text{V}^2/\text{Hz}]$  をBG強度の信頼限界とみなして解析を実施した。

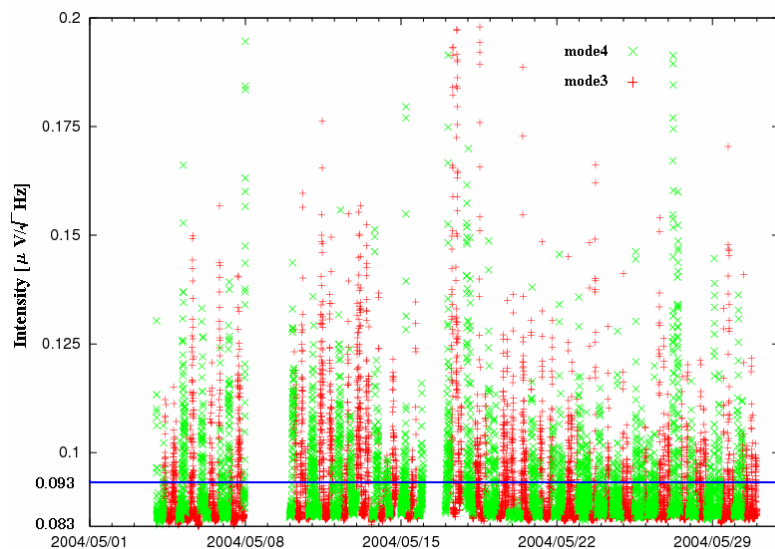


図 3.9 2004 年 5 月に Ulysses/URAP で観測された電界強度。強度補正をしていない、生データのプロットである。赤色のプロットが mode3、緑色のプロットが mode4 のときに観測された電界強度を示す。この期間、Ulysses の木理緯度は  $10^{\circ} \sim 0^{\circ}$  で赤道面付近を航行していた。

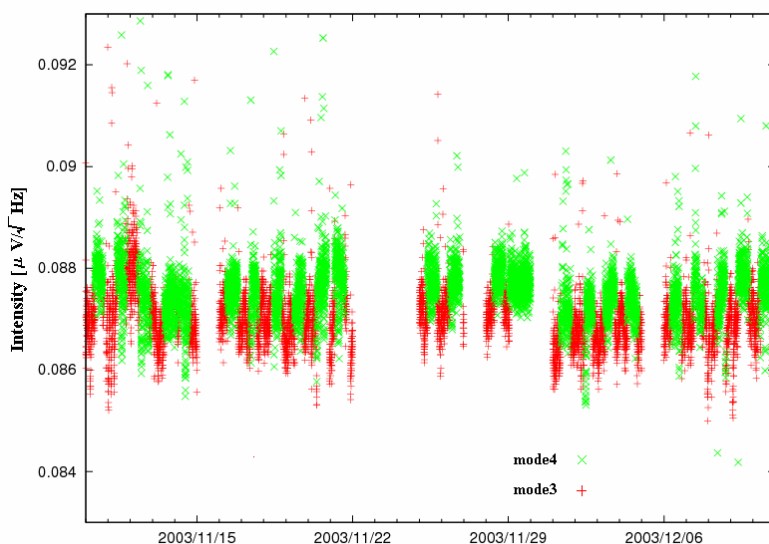


図 3.10 2003 年 11 月に Ulysses/URAP で観測された電界強度。強度補正をしていない、生データのプロットである。赤色のプロットが mode3、緑色のプロットが mode4 のときに観測された電界強度を示す。この期間、Ulysses の木理緯度は  $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$  で高緯度対帯を航行していた。

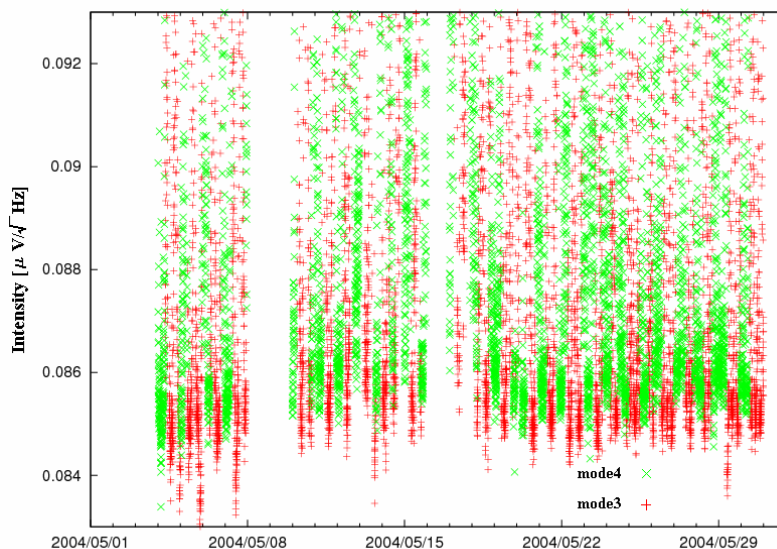


図 3.11 図 3.9のデータを図 3.10を同じ表示範囲にプロットした拡大図。

### 3.2.2 緯度依存性

本研究の Ulysses/URAP のデータ解析における大きな特徴は、第 2 章でも述べたように、Ulysses の木理緯度が  $+80^{\circ} \sim -20^{\circ}$  と広範囲で変化していた時のデータを対象としたことである。このような広範囲にわたる木理緯度変化をする探査機は Ulysses の他になく、また、Ulysses の mission の中でも本研究で用いた期間が最も大きな木理緯度変化を示していた。そのため、緯度依存性解析をする上で、本研究で用いた期間の Ulysses/URAP のデータは重要であると考えられる。

図 3.12は解析期間中Ulysses/URAPで観測されたCMLと木理緯度に対するHOMの強度である。この観測結果より、HOMは中緯度高緯度ではほとんど観測されず、赤道面付近に集中していることがわかる。

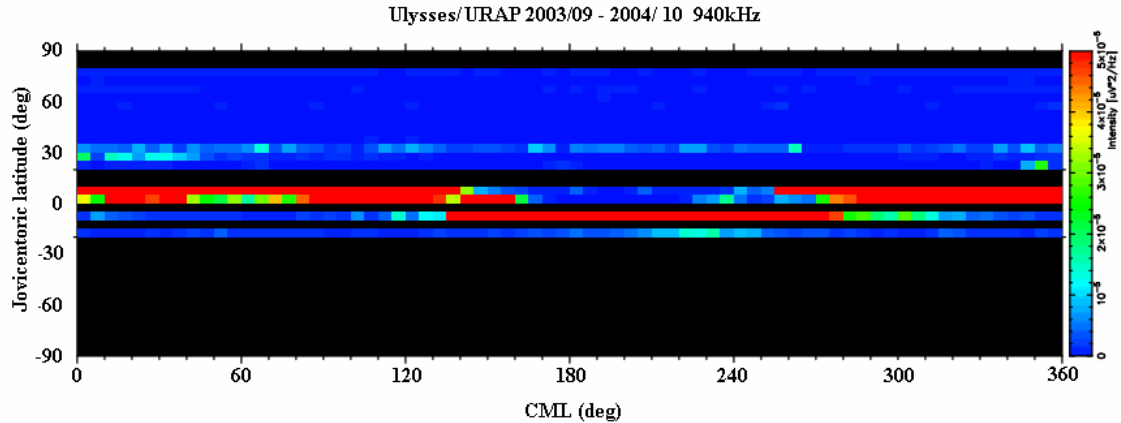


図 3.12 2003 年 9 月－2004 年 10 月に Ulysses/URAP で観測された HOM の強度マップ。横軸は Ulysses の CML[deg]、縦軸は木星緯度を表す。黒色で示されている領域はデータの無い部分である。

### 3.3 考察

#### 3.3.1 南北非対称性

3.1.1 節で述べたように HOM の放射源は南北で非対称性を持つことが示唆された。しかし、この南北非対称性は一定でなく、1996 年から 2002 年の間で変化していることがわかった。

この南北の非対称性は南北半球の電波発生域や伝播域での磁場・プラズマ環境の差異によるものと考えられる。HOM のカウンターパートと考えられる地球のオーロラキロメートル放射(AKR)の場合も南北半球での電波出現の差異が知られており、この差異は電波発生域に対する太陽紫外線照射量により制御されていることが知られている[Kumamoto et al., 2003]。Kumamoto et al. [2003] は、太陽紫外線強度が大きい夏半球では電離圏プラズマ密度が上昇し、このことが電波発生に直接的に関わる電場加速域の生成や電波成長率そのものに負の要因となるために AKR 出現率を低下させること、一方、冬半球では太陽紫外線強度が小さいためにプラズマ密度も低下し、結果として AKR の出現率が高いことを観測的に示した。この効果を木星に適用して考えてみる。木星は自転軸が

公転面法線に対し約3度傾いているために、僅かではあるが約11.8年の公転周期で極域に季節変化が生じる。1996年は南半球が夏、1998年～2001年は北半球が夏、1997年は両者の遷移期間であった。HOM出現頻度に地球のAKR出現と同様の過程が生じているとすると、1996年は南半球のHOM出現が低下、1998年～2001年は南半球のHOM出現が増加することが予想される。本研究の解析結果は出現強度であり頻度ではないが、Kumamoto et al.[2003]の結果は出現強度として考えても定性的には同じ傾向、即ち、「出現頻度の大小 $\propto$ 出現強度の大小」の関係を示すと考えられる。このことを考慮してHOM強度の南北非対称性を精査すると、1998年と2001年は南半球のHOM強度が強くなっているが、それ以外の年は予想される傾向に適合しないことが分かる。従って、本研究で確認されたHOM強度の南北非対称性には、太陽紫外線の電離圏照射量による出現制御以外の過程も働いていることを示唆している。

現時点ではGalileo以外に木星のごく近傍を航行し電波強度を統計的に計測した探査機はないため、木星近傍での南北起源の電波の直接観測に基づく非対称性についての研究は困難である。しかし、偏波に着目すると、HOMの南北非対称性に関する更なる観測的研究が期待できる。即ち、第1章で述べたようにHOMがCMIによって放射しているとする、北半球起源の電波は右回りの円偏波、南半球起源の電波は左回りの円偏波を示すこととなる。従って、この偏波特性に着目することで観測される電波の起源について南北の切り分けが可能となり、今後、より多くのデータを用いた南北非対称性に関する研究の進展が期待される。よって、今後は木星極域への直接探査とともに、偏波データの計測がさらなるHOM放射源特性の解明へ寄与すると考えられる。

### 3.3.2 LT依存性

3.1.2節で述べたとおり、Galileo/PWSの解析からLT依存性が示唆された。しかし図3.5に示すように、Galileoの軌道は時間変化とともに反時計回りでLT5hから13hへと変化しているために、Galileo/PWSだけの解析ではHOMの強度変化がLTの変化によるものか、可能性として考えられる木星自体のactivityの時間変化に伴うHOMの強度変化によるものなのかを区別できない。そこで、これらを切り分けるために本研究ではWind/WAVESのデータの解析を行った。Windは第2章でも述べたとおり、LTがほぼ一定(11-13[hour])であるために、Wind/WAVESのデータは木星自体のactivityの時間変化をとらえていると考えられる。したがって、Galileo/PWSで観測されたHOMの強度変化と



Wind/WAVESで観測されたHOMの強度変化が一致していなければ、図 3.7で示した強度変化は木星自体のactivityによるものではないことが示唆される。

Galileo/PWSとWind/WAVESで観測されたHOMの強度の時間変化を図 3.13、図 3.14に示す。図 3.13より、Galileo/PWSによって観測されたHOMのおおよその変化は1996年、1997年付近でピークとなり、2000年にかけて強度が減少し、その後増加している。それに対して、図 3.14より、Wind/WAVESによって観測されたHOMのおおよその変化は1996年から2000年にかけて強度が増加し、2000年をピークにその後減少していることがわかる。このことからGalileo/PWS、Wind/WAVESで観測されたHOMには明白な相関はなく、Galileo/PWSの観測結果は木星自体のactivityの変化によるものではないことが示された。よって3.1.2節の図 3.7で示したHOMの強度変化はLTによるものと考えることができる。

このように、先行研究(Menietti et al. [1999])の結果では明瞭ではなかった、木星自体の activity の変化との関係、また、木星からの距離依存性との関係が本研究で求められた結果、より明瞭な LT 依存性が示唆された。この LT 依存性の成因に関しては第5章で考察する。

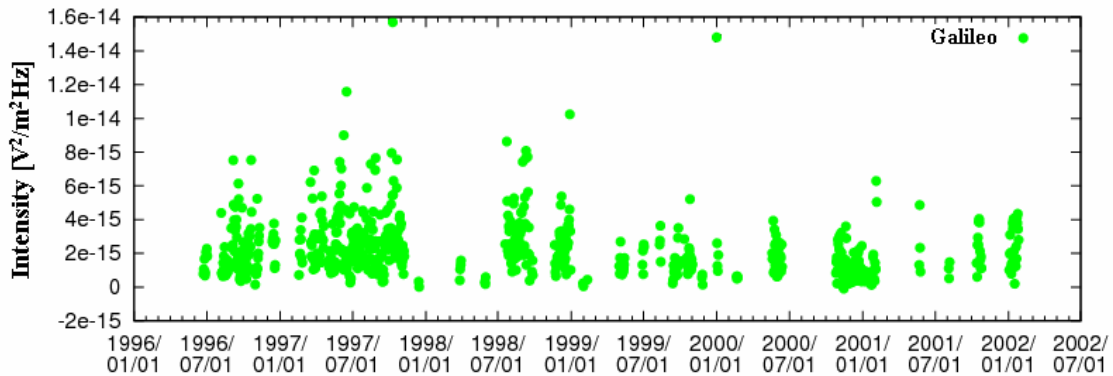


図 3.13 Galileo/PWS によって観測された HOM 強度の時系列プロット。一つの点は1日の平均強度を表す。

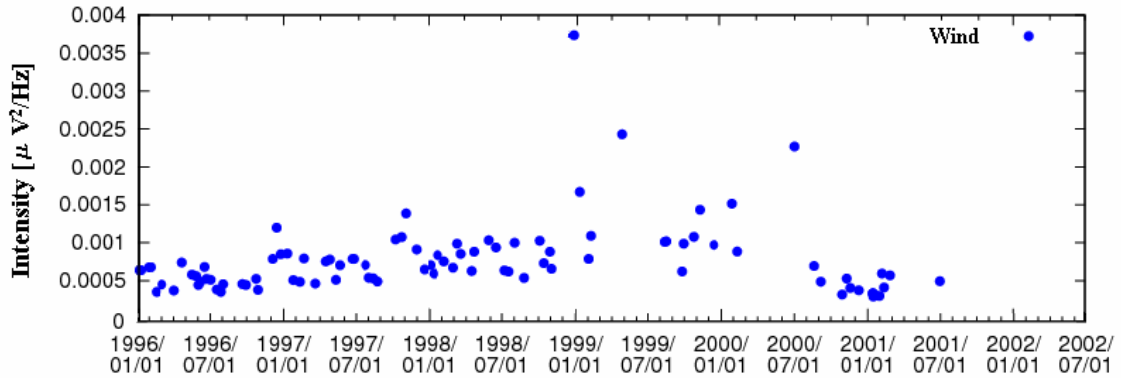


図 3.14 Wind/WAVES によって観測された HOM 強度の時系列プロット。横軸は Galileo/PWS と同じく 1996/01/01–2002/07/01 の期間を表示している。一つの点は Galileo/PWS と同様に、1 日の平均強度を表す。

### 3.3.3 緯度依存性

3.2.2節で示したように、HOMは赤道面付近で集中して観測されているように見える。この傾向を定量的に示すため、HOM強度を木理緯度  $10^\circ$  ごとに平均し、CMLに対する強度で求めた図が図 3.15、図 3.16である。この2つの図より、Ulyssesが赤道面付近を航行していたときに観測したHOMの強度と比べ、Ulyssesが高緯度付近を航行していたときに観測したHOMの強度が明らかに弱くなっていることがわかる。

以降では、緯度依存性の詳細を見ていく。まず、赤道面付近に着目する。特に、図 3.15の  $-10^\circ < \text{木理緯度} < 0^\circ$  と  $0^\circ < \text{木理緯度} < 10^\circ$  の結果から、赤道面内で観測されたHOMは、緯度が低くなると、HOM強度の極大となる2つのピークのCMLの値が互いに近づく緯度依存性を示していることがわかる。 $-20^\circ < \text{木理緯度} < -10^\circ$ 、 $20^\circ < \text{木理緯度} < 30^\circ$  の場合も、赤道面付近と比べると強度は弱い、同様の緯度依存性を示す結果となっている。

次に、中緯度から高緯度に着目する。ここでのHOM強度は赤道面と比べてはるかに小さい値となっているので、3.2.1節で述べたBG強度の変動分との関係も考慮する必要がある。3.2.1節に述べたように、Ulysses/URAPのBG強度の信頼限界は  $2 \times 10^{-6} [\mu \text{ V}^2/\text{Hz}]$  程度であるので、それよりも小さな値は信頼性に欠けると考えられる。そのことを考慮すると、図 3.16より、赤道面付近 ( $-10^\circ < \text{木}$

理緯度 $<10^\circ$  ) 以外の木理緯度範囲において、特に、木理緯度  $40^\circ$  以上ではほとんど有意な強度の HOM は観測されていないことが示唆される。

よって Ulysses/URAP の観測結果から、HOM は赤道帯の  $-10^\circ <$  木理緯度  $<10^\circ$  で集中して観測され、中高緯度では観測されないか、観測されていたとしても赤道帯の HOM 強度に比べ、 $1/100$  以下の強度の微弱な HOM であったことが示唆された。

次章ではこの Ulysses の観測結果に対して、Ray tracing を用いてその成因の考察を行っていく。

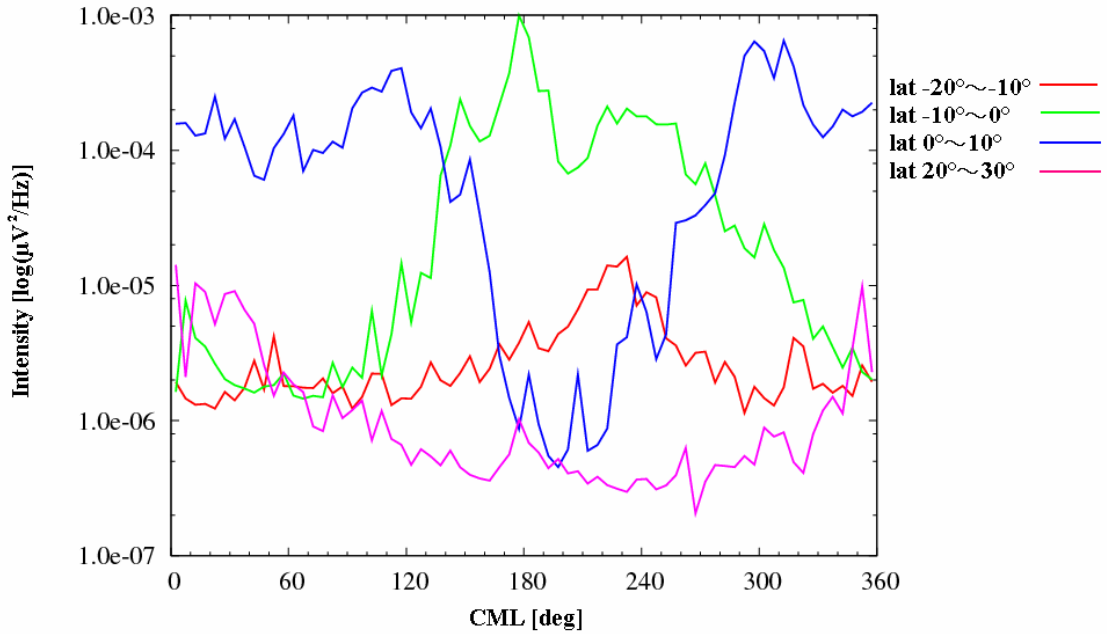


図 3.15 Ulysses の木理緯度が  $30^\circ \sim -20^\circ$  のときの HOM 強度 CML 依存性。赤線： $-20^\circ <$  木理緯度  $< -10^\circ$ 、緑線： $-10^\circ <$  木理緯度  $< 0^\circ$ 、青線： $0^\circ <$  木理緯度  $< 10^\circ$ 、桃色線： $20^\circ <$  木理緯度  $< 30^\circ$  に対する結果を示す。

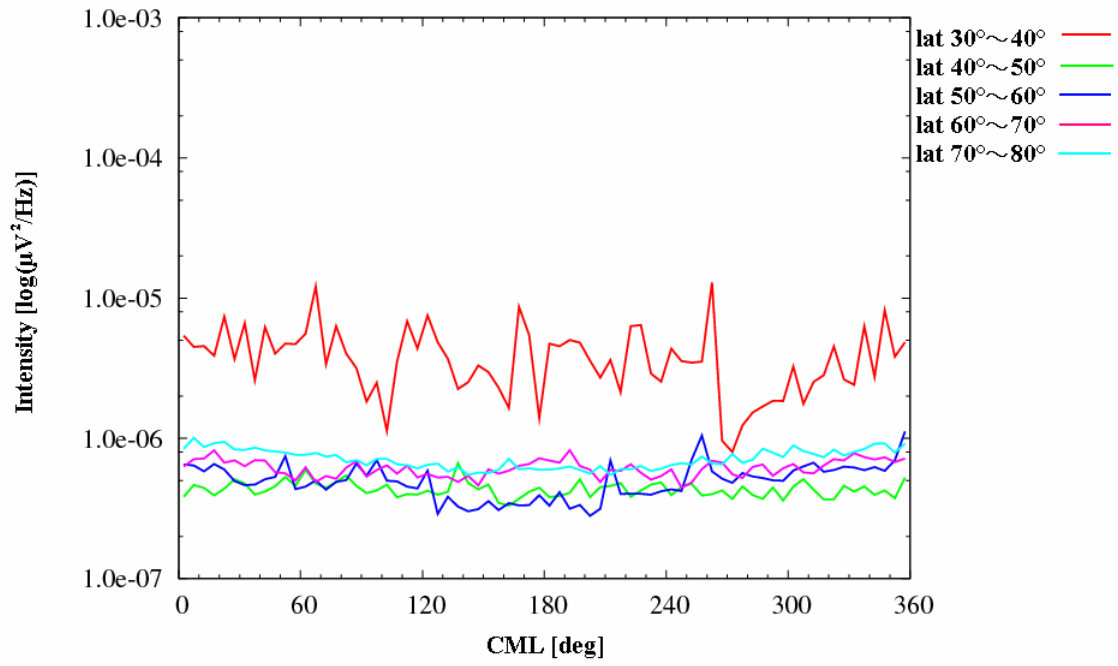


図 3.16 Ulysses の木理緯度が  $80^{\circ} \sim 30^{\circ}$  のときの HOM 強度の CML 依存性。赤線： $30^{\circ} < \text{木理緯度} < 40^{\circ}$ 、緑線： $40^{\circ} < \text{木理緯度} < 50^{\circ}$ 、青線： $50^{\circ} < \text{木理緯度} < 60^{\circ}$ 、桃色線： $60^{\circ} < \text{木理緯度} < 70^{\circ}$ 、水色線： $70^{\circ} < \text{木理緯度} < 80^{\circ}$  に対する結果を示す。



## 第4章 Ray tracing 解析

本章では第3章で示した Ulysses/URAP の観測結果に基づき、Ray tracing を用いて解析を行ない、観測結果を再現しうる HOM の放射条件に関する考察を行う。

### 4.1 計算方法

本節では本研究で用いた3次元レイトレーシングの計算方法について述べる。

#### 4.1.1 分散関係式を用いた Ray tracing の原理

異方性低温プラズマ中を伝搬する、R-X モード、L-O モードの電磁波の分散関係式は、Appleton-Hartree の式より、

$$n^2 = 1 - \frac{2X}{2 - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{1-X} + \rho \sqrt{\frac{Y^4 \sin^4 \theta}{(1-X)^2} + 4Y^2 \cos^2 \theta}} \quad (4.1)$$

と与えられる。ここで  $\rho = -1$  は R-X モード、 $\rho = +1$  は L-O モードである。また、 $\theta$  は波数ベクトルとその場の磁場ベクトルとがなす角である。電磁波の周波数を  $f$  として、その他のパラメータは以下の式で与えられる。

$$X = \left( \frac{f_p}{f} \right)^2$$

$$Y = \frac{f}{f_c} \quad (4.2)$$

$$n = \frac{c|\vec{k}|}{2\pi f}$$

ここで、 $f_p$ と $f_c$ はその場のプラズマ周波数、及び、電子サイクロトロン周波数である。また、 $n$ は屈折率、 $c$ は真空中における光の速さである。電磁波の発生、伝搬を考える空間はきわめて密度の薄い領域であるので、本研究では衝突項を無視することにする。

ここで、新たな関数 $G(t, f, \vec{r}, \vec{k})$ を次のように定める。

$$G(t, f, \vec{r}, \vec{k}) = \left( \frac{c|\vec{k}|}{2\pi f} \right)^2 + \frac{2X}{2 - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{1-X} + \rho \sqrt{\frac{Y^4 \sin^4 \theta}{(1-X)^2} + 4Y^2 \cos^2 \theta}} = 1 \quad (4.3)$$

ここで、 $\vec{r}$ 、及び、 $t$ は、電磁波の伝搬路上の位置、及び、時刻を表す。この時刻 $t$ は、媒体が時間変化することもある考慮して、独立変数として与えられている。(4.3)式は電磁波の伝搬路上において、常に成立する必要があるので、電磁波の伝搬路に沿った長さのパラメータ $s$ を用いて、

$$\frac{dG}{ds} = \frac{\partial G}{\partial t} \frac{dt}{ds} + \frac{\partial G}{\partial f} \frac{df}{ds} + \frac{\partial G}{\partial \vec{r}} \frac{d\vec{r}}{ds} + \frac{\partial G}{\partial \vec{k}} \frac{d\vec{k}}{ds} = 0 \quad (4.4)$$

が常に成立する必要がある。ここで、媒体が時間変化しない定常な場合、また、電磁波が伝搬路上で周波数変化しないことを考慮すると、

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \frac{df}{ds} = 0 \quad (4.5)$$

となる。よって(4.4)式は

$$\frac{dG}{ds} = \frac{\partial G}{\partial \vec{r}} \frac{d\vec{r}}{ds} + \frac{\partial G}{\partial \vec{k}} \frac{d\vec{k}}{ds} = 0 \quad (4.6)$$

となる。ここで、 $d\vec{k}/ds$ と $dG/d\vec{r}$ 、及び、 $d\vec{r}/ds$ と $dG/d\vec{k}$ の関係を考慮すると、(4.6)式成立のための必要十分条件は

$$\frac{d\vec{r}}{ds} = \frac{\partial G}{\partial \vec{k}} \quad (4.7)$$

$$\frac{d\vec{k}}{ds} = -\frac{\partial G}{\partial \vec{r}}$$

である。この条件の下、(4.4)式を満たすためには、

$$\frac{dt}{ds} = -\frac{\partial G}{\partial f} \quad (4.8)$$

$$\frac{df}{ds} = \frac{\partial G}{\partial t}$$

でなければならない。(4.7)、(4.8)式の下、(4.4)式は電磁波の伝搬路上で常に成立する。

(4.7)、(4.8)式、及び、 $d\vec{r}$ 、 $d\vec{k}$ を用いることで、

$$d\vec{r} = \frac{d\vec{r}/ds}{dt/ds} \cdot dt = -\frac{\partial G/\partial \vec{k}}{\partial G/\partial f} \cdot dt \quad (4.9)$$

$$d\vec{k} = \frac{d\vec{k}/ds}{dt/ds} \cdot dt = \frac{\partial G/\partial \vec{r}}{\partial G/\partial f} \cdot dt$$

$d\vec{r}$ 、 $d\vec{k}$ が得られるとGが定まり、さらにこのGから、次のステップで進むべき方向と伝搬ベクトル変化を知ることができる。これらを利用することによって、電磁波の伝搬路は次の関係式で記述することができる。



$$\begin{aligned}
 G_j &= G(t, f, \vec{r}_j, \vec{k}_j) \\
 d\vec{r}_{j+1} &= -\frac{\partial G_j / \partial \vec{k}_j}{\partial G_j / \partial f} \cdot dt_j \\
 d\vec{k}_{j+1} &= \frac{\partial G_j / \partial \vec{r}_j}{\partial G_j / \partial f} \cdot dt_j \\
 \vec{r}_{j+1} &= \vec{r}_j + d\vec{r}_{j+1} \\
 \vec{k}_{j+1} &= \vec{k}_j + d\vec{k}_{j+1} \\
 G_{j+1} &= G(t, f, \vec{r}_{j+1}, \vec{k}_{j+1})
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

本研究では上式に基づいて三次元 Ray tracing の計算を行った。

### 4.1.2 モデル

本研究では磁場とプラズマ密度に対して過去に提唱されているモデルを用いて Ray tracing を行った。

HOMのsource領域は木星中心から約  $2.5R_J$  離れており、伝搬路の大半はそれ以遠のダイポール磁場が卓越している領域と考えられるのが出現特性は放射源領域近傍の磁場配位の影響を強く受ける可能性がある。したがって、磁場モデルとしては現段階で最も信頼度が高いとされるVIP 4 モデル[Connerney *et al.*, 1998] (図 4.1) を参照して用いた。

一方、プラズマ密度モデルとしてはDivine and Garrett[1983] (図 4.2) を参照して用いた。このモデルではHOMの放射源領域付近のプラズマ周波数は10kHz程度、伝搬時に伝搬方向に影響を与える可能性を持つプラズマトーラスのプラズマ周波数は最も密度の高い中心部で550kHz程度となっている。

図 4.1、図 4.2はそれぞれSystem III  $110^\circ$  の子午面でのサイクロトロン周波数、プラズマ周波数のプロットである。

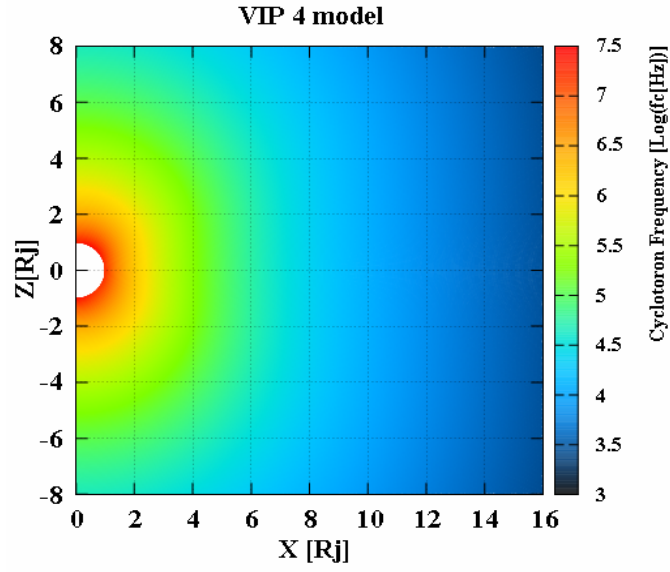


図 4.1 VIP 4 モデル[Connerney *et al.*, 1998]を用いて算出した電子サイクロトン周波数分布。System III  $110^\circ$  の子午断面で表す。横軸、縦軸ともに木星中心からの距離[R<sub>j</sub>]を示す。

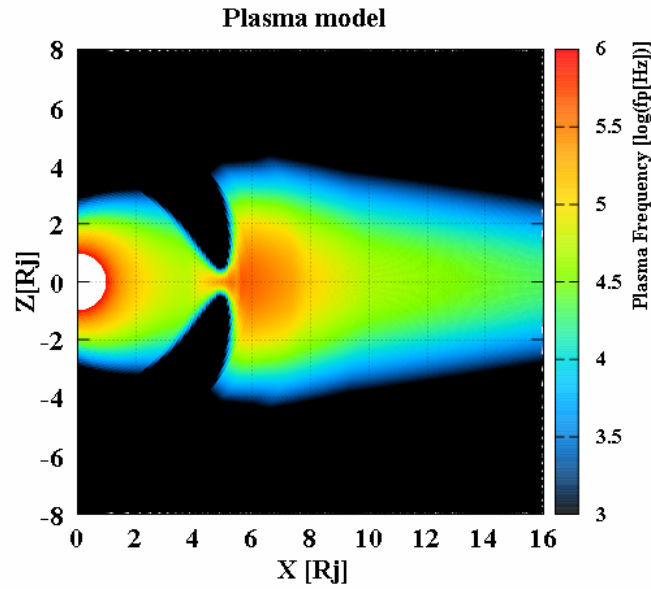


図 4.2 プラズマモデル[Divine and Garrett, 1983]を用いて算出したプラズマ周波数分布。System III  $110^\circ$  の子午断面で表す。横軸、縦軸ともに木星中心からの距離[R<sub>j</sub>]を示す。

### 4.1.3 計算条件

本研究におけるRay tracingでは、4.1.2節で述べた、磁場モデル、プラズマモデルを用いた不変の電磁プラズマ環境の下で、4.1.1節で述べた計算式に従い伝搬路を導出した。Ray tracingには放射条件を規定する複数のパラメータがあり、そのパラメータを初めに与えることによって計算を行った。これらについては以下のように設定した。

まず初めに、HOMはCMIによって放射しているとされているので、卓越して放射されるモードを考慮し、電磁波はR-Xモードと仮定した。また、周波数はUlysses/URAPの観測周波数である940kHzに設定した。一方、フリーパラメータとして、L値、放射coneの開き角（cone half-angle）である $\beta$ 、周波数 $f$ とR-Xモードのカットオフ周波数 $f_{R-X}$ の比である $f/f_{R-X}$ を設定した。L値は過去の研究[Ladreitner and Leblanc, 1990a, b; Reiner et al., 1993a, b; Ladreitner et al., 1994; Zarka et al., 2001]に基づき $8 \leq L \leq 20$ の範囲、 $\beta$ は $40^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ の範囲で与えた。また、 $f/f_{R-X}$ は $1.000001 \leq f/f_{R-X} \leq 1.01$ とした。 $f/f_{R-X}$ は放射源の高度を表し、この値が1に近づくほど放射源は木星に近づく。表4.1にそれぞれのパラメータの値を示す。

表 4.1 Ray tracing におけるパラメータ。

parameter	
$f$	940kHz
Wave mode	R-X モード
$L$	8 – 20
$\beta$	$40^\circ - 90^\circ$
$f/f_{R-X}$	1.000001 – 1.01

以上のようにパラメータを設定し、計算では放射源を南北両半球とし、同L-shell上に経度方向 $5^\circ$ 刻みに一周分の72点をおいた。そして、一つの放射源のhollow cone上で方位角方向に $1^\circ$ 刻みに360本のrayを放射させた。この放射の模式図が図4.3である。このようにして放射させたrayを $10R_j$ まで追跡し、それ以遠は直進すると仮定してrayの到達先を算出した。 $10R_j$ ではR-Xモード波の屈折率はほとんど1となっており、直進の仮定は妥当であると考えられる。rayの到達先の計算例を、縦軸を木理緯度[deg]、横軸をCML[deg]として図4.4に示す。なお、図4.4の場合、表示の都合上、hollow cone上での刻みを方位角方向に $10^\circ$ 間隔とした。

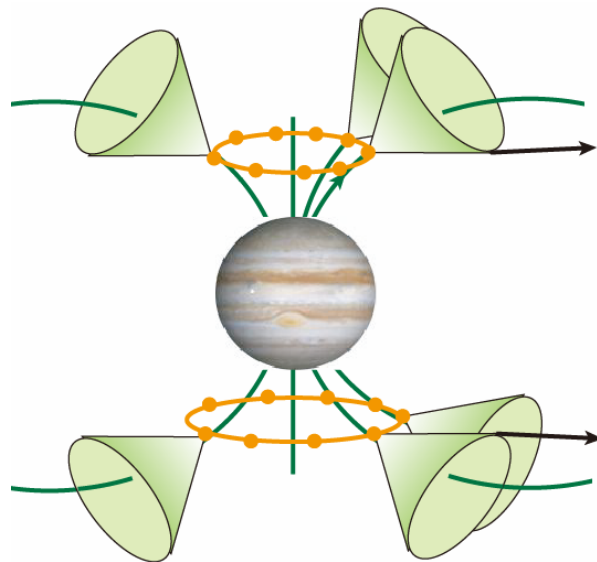


図 4.3 Ray tracing による放射の模式図。緑線は磁力線を表す。●は放射源を示し、経度方向に $5^\circ$ 刻みに一周分配置する。rayはその放射源から薄い空洞の円錐状に放射する。

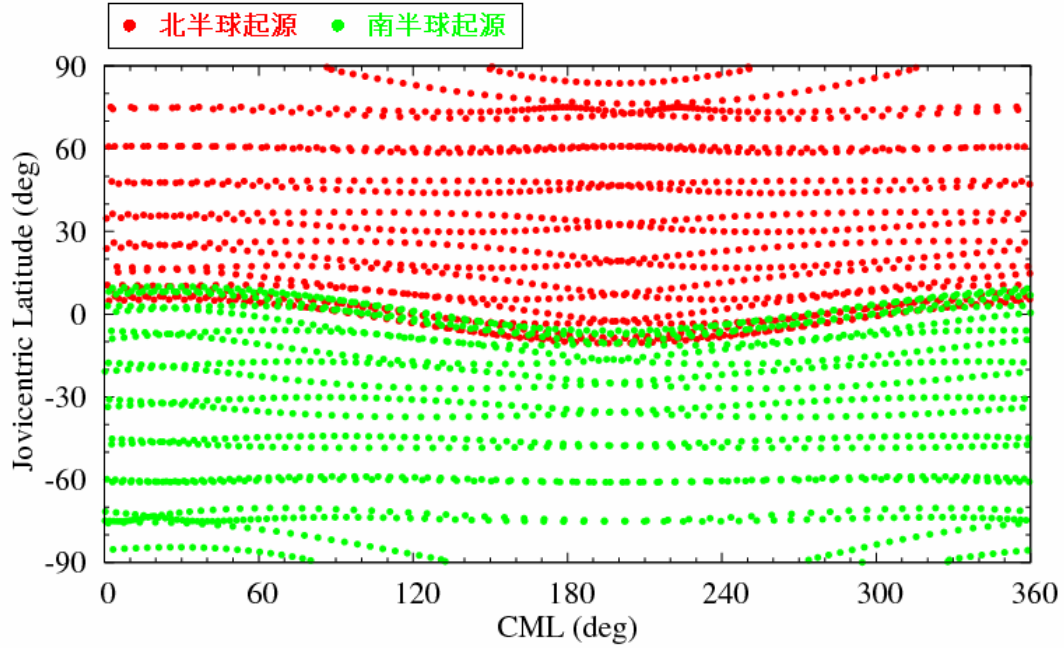


図 4.4 rayの到達先の計算結果の例。放射条件は $L=12$ 、 $\beta = 50^\circ$ 、 $f/f_{R-X}=1.01$  である。横軸が観測者のCML[deg]、縦軸が木理緯度[deg]を表す。●が北半球起源の電波を、●が南半球起源の電波を表す。

#### 4.1.4 Ray tracing による強度

本研究では Ulysses/URAP で観測された HOM の強度と、Ray tracing により見積もられる HOM の強度を用いてそれらの比較から HOM の放射条件の議論を行っていく。ここで両者の次元を合わせるために、Ulysses は Ulysses/URAP で観測された電界強度の 2 乗であるパワーの次元にした。一方、Ray tracing については、木理緯度と CML のある限られた範囲の中に到達する ray path の本数がパワーの次元に相当するとした。よって Ray tracing での強度は ray path の本数を相対強度として扱い、Ulysses で観測された強度との比較に基づく議論を行った。

## 4.2 計算結果

第3章で述べたように、Ulysses/URAPの観測結果より、HOMの強度は赤道面付近の $-10^\circ < \text{木理緯度} < 10^\circ$ で集中して観測され、中緯度、高緯度ではほとんど観測されないことが示唆された。このような観測事実を再現しうる条件を探るために、4.1.3節で述べた条件設定の下、フリーパラメータを変更しつつ、Ray tracingを行った結果を以下に示す。

### 4.2.1 $\beta$ の変化に対する放射特性変化

$\beta$  の変化に対するRay tracingの結果について述べる。図4.5は $L=12$ 、 $f/f_{R-X}=1.01$ に固定して $\beta$ を変化させた場合の結果である。上段の図は図4.4と同じフォーマットの図で、赤と緑のプロットはそれぞれ北半球起源の電波と南半球起源の電波を表している。中段の図はrayを放射源から方位角方向に $1^\circ$ 刻みで放射させた場合の結果を用いて、横軸をCML[deg]、縦軸を木理緯度[deg]にとり、受信されるHOMの相対強度をカラーで表したダイアグラムである。また、下段の図の折線グラフはピンクが $0^\circ < \text{木理緯度} < 5^\circ$ 、青が $70^\circ < \text{木理緯度} < 75^\circ$ の相対強度を示している。図4.5より、 $\beta$ を大きくしていくと、赤道面付近において北半球起源の電波と南半球起源の電波が混在して観測される緯度帯が広くなる傾向が見てとれる。この傾向はどの $L$ 値、 $f/f_{R-X}$ の場合の計算結果についても同様となった。

### 4.2.2 $L$ 値の変化に対する放射変化

$L$ 値の変化に対するRay tracingの結果について述べる。図4.6は $\beta=60^\circ$ 、 $f/f_{R-X}=1.01$ に固定して、 $L$ 値を変化させた場合の結果である。図のフォーマットは図4.5と同様である。 $L$ 値を大きくしていくと北半球起源の電波と南半球起源の電波が混在して観測される緯度帯が狭くなる傾向が見てとれる。この傾向はどの $\beta$ 、 $f/f_{R-X}$ の場合の計算結果についても同様となった。

### 4.2.3 $f/f_{R-X}$ の変化に対する放射変化

$f/f_{R-X}$ の変化に対するRay tracingの結果を述べる。図 4.7は $L=12$ 、 $\beta=50^\circ$  に固定して $f/f_{R-X}$ を変化させた場合の結果である。図のフォーマットは図 4.5と同様である。 $f/f_{R-X}$ を 1 に近づけていくと、北半球起源の電波と南半球起源の電波が混在して観測される緯度帯が狭くなる傾向が見てとれる。また、赤道面付近の分布に、より大きい値の場合に認められる特徴的なうねりがなくなり、赤道面付近で南北の電波に重なりが生じた場合でも、観測値で認められているCML依存性の傾向が現れないことになる。したがって、 $f/f_{R-X}$ の値が 1 に極めて近い場合は赤道面においてCML依存性が再現されないことがわかった。これらの傾向はどのL値、 $\beta$ の場合の計算結果についても同様となった。

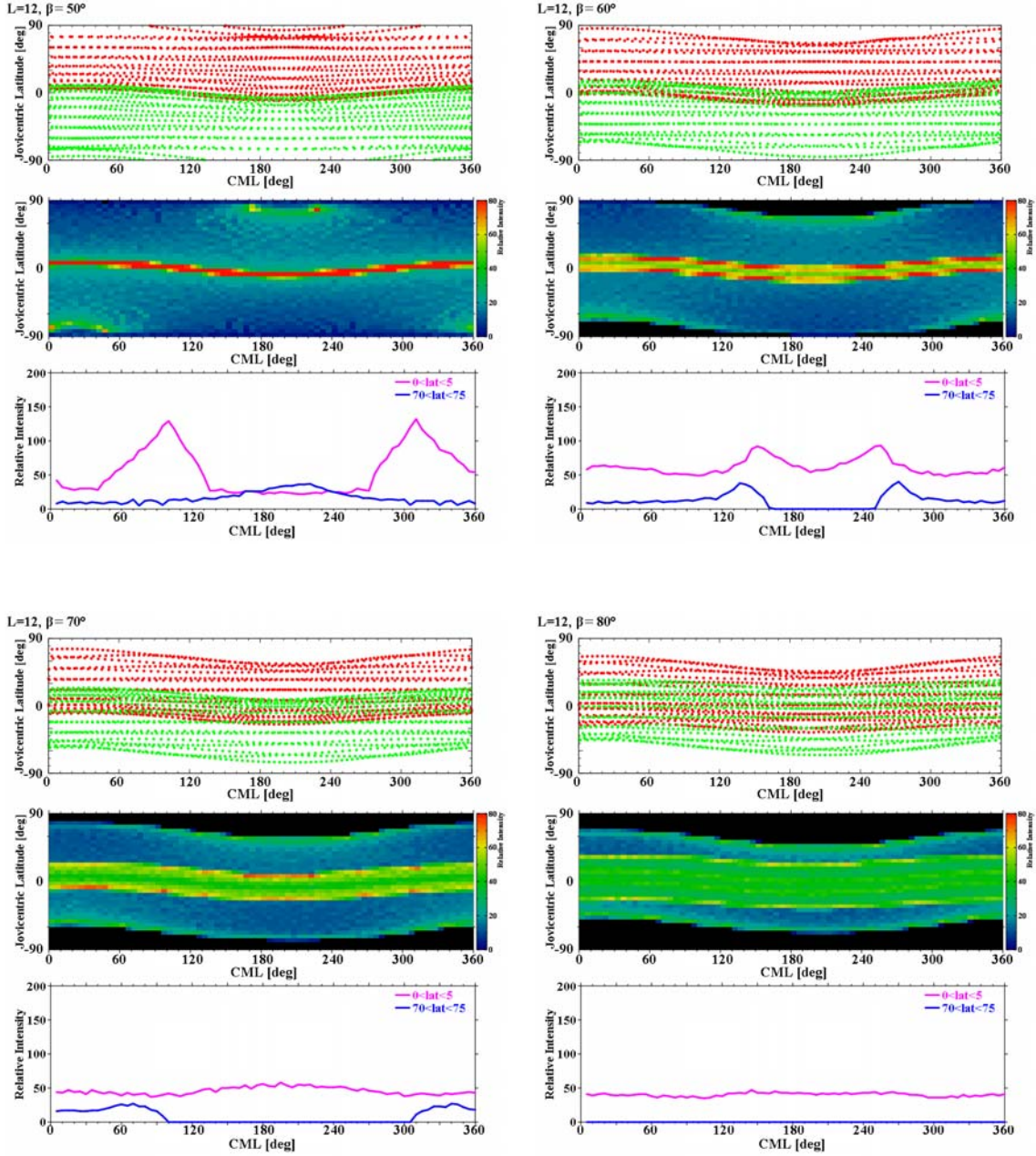


図 4.5  $L=12$ ,  $f/f_{R-X}=1.01$  と固定し、 $\beta$  を変化させたときの Ray tracing の結果。左上： $\beta=50^\circ$ 、右上： $\beta=60^\circ$ 、左下： $\beta=70^\circ$ 、右下： $\beta=80^\circ$ 。それぞれの図の上段は図 4.4 と同様、●が北半球起源、●が南半球起源の電波を示す。中段は上段の図を相対強度で示したダイアグラム(但し、rayの本数を 10 倍にして導出してある)。相対強度をカラーコードで示す。下段はピンク色線： $0^\circ < \text{木理緯度} < 5^\circ$ 、青線： $70^\circ < \text{木理緯度} < 75^\circ$  における相対強度を表す。



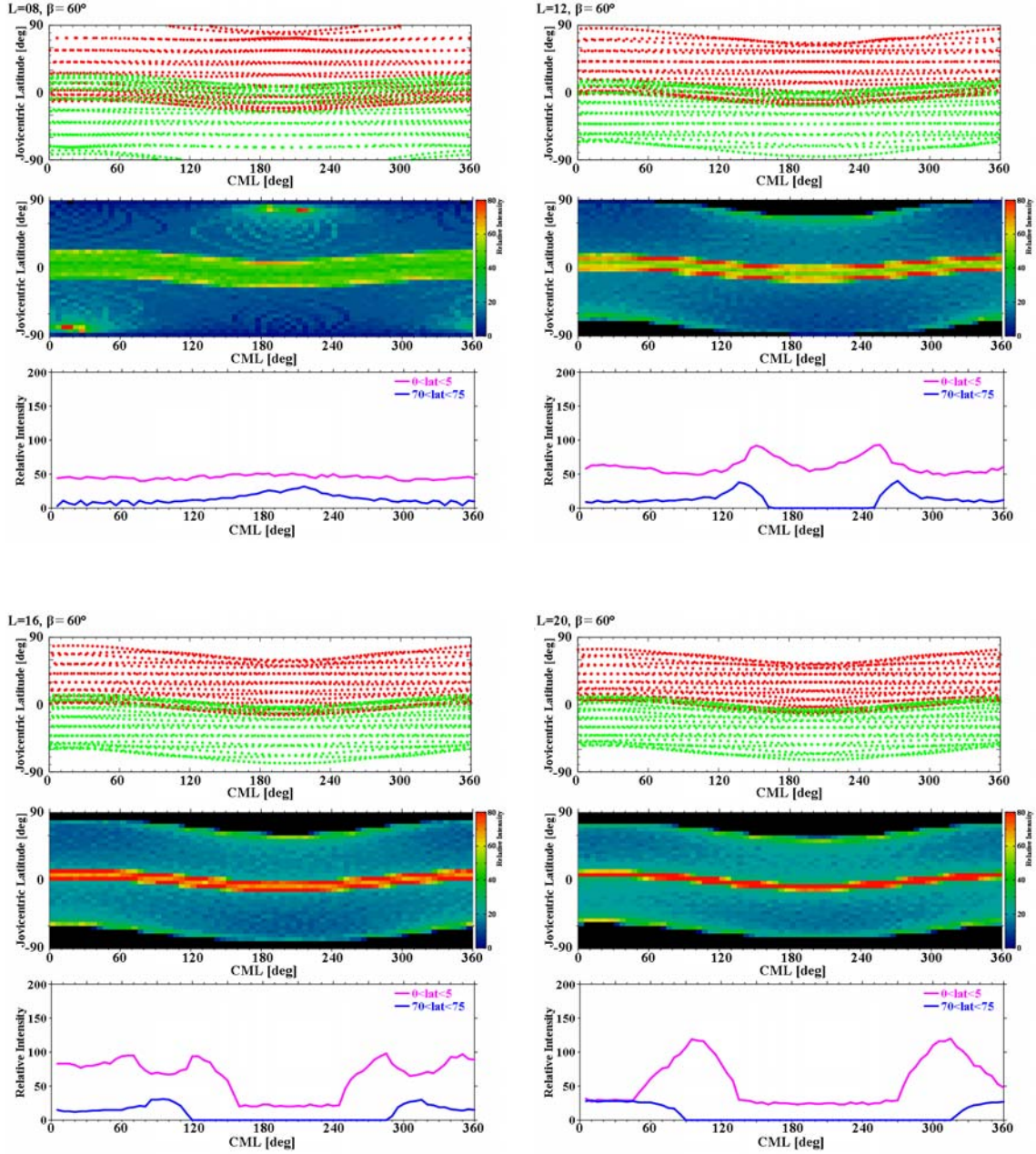


図 4.6  $\beta = 60^\circ$ 、 $f/f_{R-X} = 1.01$  に固定し、 $L$  値を変化させたときの Ray tracing の結果。左上： $L=8$ 、右上： $L=12$ 、左下： $L=16$ 、右下： $L=20$ 。図のフォーマットは図 4.5 と同様である。

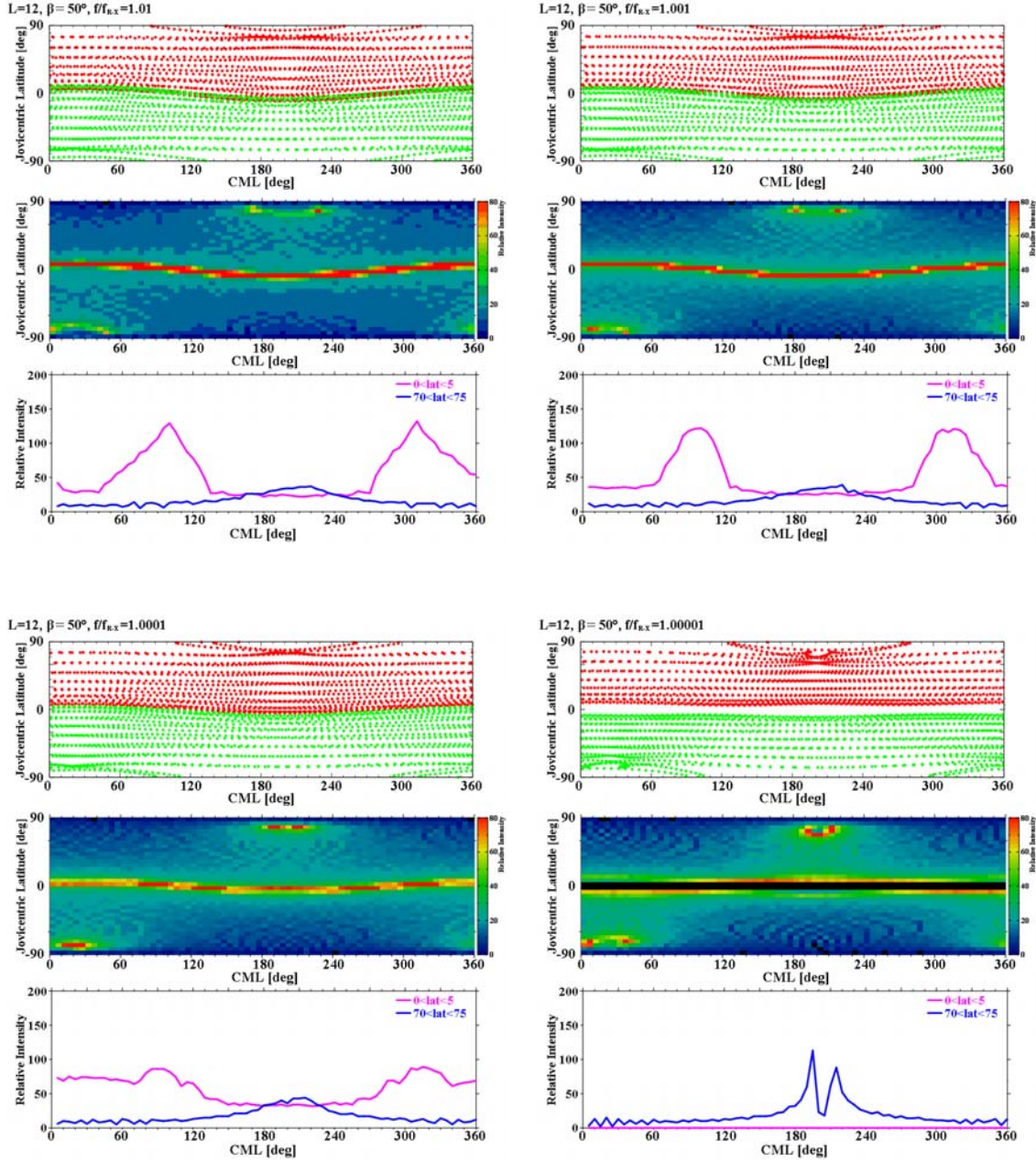


図 4.7  $L=12$ ,  $\beta=50^\circ$  に固定し、 $f/f_{R-X}$  を変化させたときの Ray tracing の結果。左上:  $f/f_{R-X} = 1.01$ 、右上:  $f/f_{R-X} = 1.001$ 、左下:  $f/f_{R-X} = 1.0001$ 、右下:  $f/f_{R-X} = 1.00001$ 。図のフォーマットは図 4.5 と同様である。

### 4.2.4 まとめ

4.2.1節～4.2.3節で述べてきたように、赤道面付近では強い電波が観測され、中高緯度ではほとんど電波が観測されないという 2 つの顕著な観測結果を満たすような放射条件を見つけるために、フリーパラメータを様々に変化させ、Ray tracingを行った。

この結果を表 4.2に総括する。高緯度でHOMがほとんど観測されない条件は  $\beta = 90^\circ$ 、 $L=20$  の場合であり、 $f/f_{R-X}$ の値にはほとんど依存しない。このことに着目して、 $\beta = 90^\circ$ 、 $L=20$  に固定して、 $f/f_{R-X}$ をフリーパラメータとして変動させた。このとき、 $f/f_{R-X}=1.000001$  では、赤道での強度が大きく、高緯度で観測されないという条件をある程度満たす結果が得られたが(図 4.8)、中緯度でCML200° 付近の強度が大きくなり、観測された緯度依存性条件には合致しない。

以上より、今回適用した計算条件だけでは観測結果は解釈することができないことが明らかになったが、この原因究明に基づく HOM の放射起源の考察を次章で進める。

表 4.2 Ray tracing の結果。○：観測結果を説明可能、△：観測結果を説明できる可能性あり、×：観測結果を説明できる可能性なしを示す。

観測による制約条件 フリーパラメータ	赤道強度：大	中高緯度強度：～0
$\beta : 40^\circ \rightarrow 90^\circ$	○ → ×	× → △
$L : 8 \rightarrow 20$	× → ○	× → △
$f/f_{R-X} : 1.01 \rightarrow 1.000001$	△ → ×	× → ×

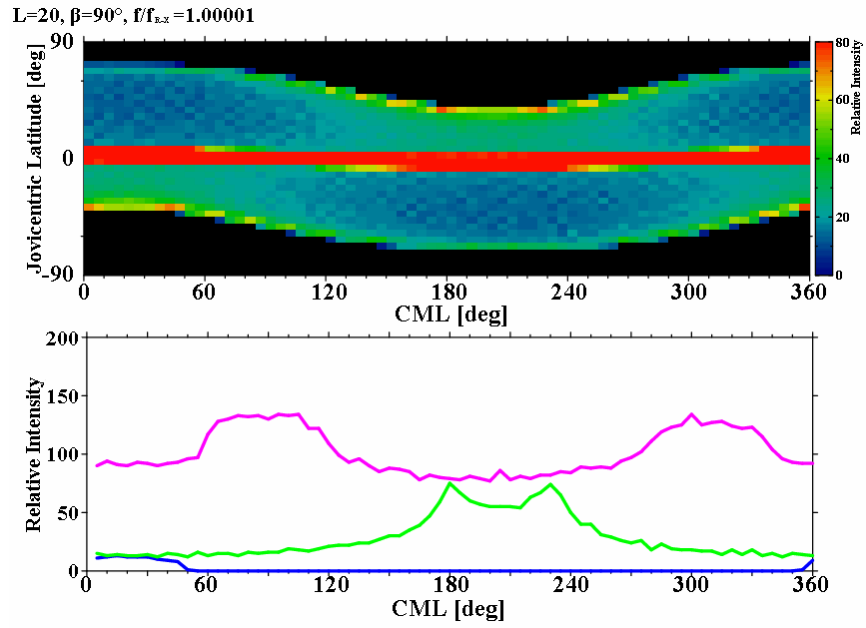


図 4.8  $L=20$ 、 $\beta = 90^\circ$ 、 $f/f_{R-X}=1.00001$  のときの Ray tracing の計算結果。上段は CML[deg]、木理緯度[deg]に対する相対強度をカラーで表す。下段はピンク色線： $0^\circ < \text{木理緯度} < 5^\circ$ 、緑線： $35^\circ < \text{木理緯度} < 40^\circ$ 、青線： $70^\circ < \text{木理緯度} < 75^\circ$  における相対強度を表す。



## 第5章 考察：HOM 放射起源

第3章では Galileo/PWS と Ulysses/URAP による観測結果をまとめ、第4章では特に、Ulysses/URAP による観測結果に対して、Ray tracing を用いて考察を行い、観測された HOM の放射起源を探った。この結果、HOM の放射起源として想定されてきた、木星極域磁力線上からの一様放射という単純な仮定では本研究で得られた観測結果は説明されないことが明らかになった。

本章では観測データの再考、及び、Ray tracing の放射条件の考察をさらに進めることで、HOM の放射起源を議論する。

### 5.1 BG 強度の見積誤差による出現特性への影響

Ray tracing の計算結果によると、様々なパラメータにおいて、赤道面付近における電波の集中度合や、高緯度帯における電波の集中度合に違いがあるものの、中緯度帯においては弱い電波が常に観測される結果となり、Ulysses/URAP の観測とは異なる結果となった。中緯度帯において電波が常に観測されないような条件は、第4章の表4.1に示したような HOM の放射起源として考えるパラメータの範囲では再現できない。考えられるこの原因の一つとして、木星からの電波が常に放射されており、それを探査機で観測していたために、解析ではこの成分を BG 強度として差し引いてしまった可能性が考えられる。

図5.1に1994年から2005年までにUlysses/URAPによって観測された電界強度の生データをプロットする。緑と青のプロットが電界強度を示す。両者の違いはsummationモードのonとoffのときの違いであり、青のプロットと緑のプロットでは全体的にレベルが異なっている。また、図5.1のピンク色の線はUlyssesと木星の距離の逆数を示している。仮に、木星からの電波が常に観測されているとすると、電界強度と距離の逆数は同じトレンドを示すと考えられる。しかし、青と緑の各プロットの変動傾向と、Ulyssesと木星の距離の逆数とを比



較しても傾向が合わない。一方で、各プロットのどちらも、電界強度の下限がかなり変動していることがわかる。この変動も木星からの距離との相関が特に見えないことから、Ulysses/URAPのデータは木星起源以外の電界成分がBG雑音の主体をなしていることが考えられる。今、仮にUlyssesが木星から最も離れていた1998年初めと、最も近づいていた2004年初めの電界強度の下限の観測値の違い(約  $0.082 \mu \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  と約  $0.086 \mu \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ )が、受信されたHOMの強度差に起因しており、この2つの期間でHOM、BGとも変化がなかったとする。そのように仮定すると、HOMの強度は木星から1AUの距離で約  $0.004 \mu \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  となる。この強度が常に木星から放射されていたHOMの強度として存在しており、第3章で示した解析において、BGと区別がつかないために差し引かれていたと仮定すると、観測時のUlyssesと木星の距離も考慮して、赤道付近では約  $3 \times 10^{-5} \mu \text{V}^2/\text{Hz}$  の強度増加が見込まれる。第3章で示した結果では赤道付近と高緯度付近の強度差は、peakとpeakの差でおよそ100倍以上であったが、今回の見積値を入れて考えると、その差は20倍程度となる。しかし第4章で示したRay tracingの結果では、両者の差は高々5倍程度である。HOMの常時放射の存在を仮定した簡単な見積からは、観測値と第4章で示したRay tracingの結果の差異を説明できない。将来の探査における課題ともなる、BGと自然電波の分別が行われるまで結論は持ち越しとなるが、本研究では観測値とRay tracingの差異の他の原因の考察も進める。

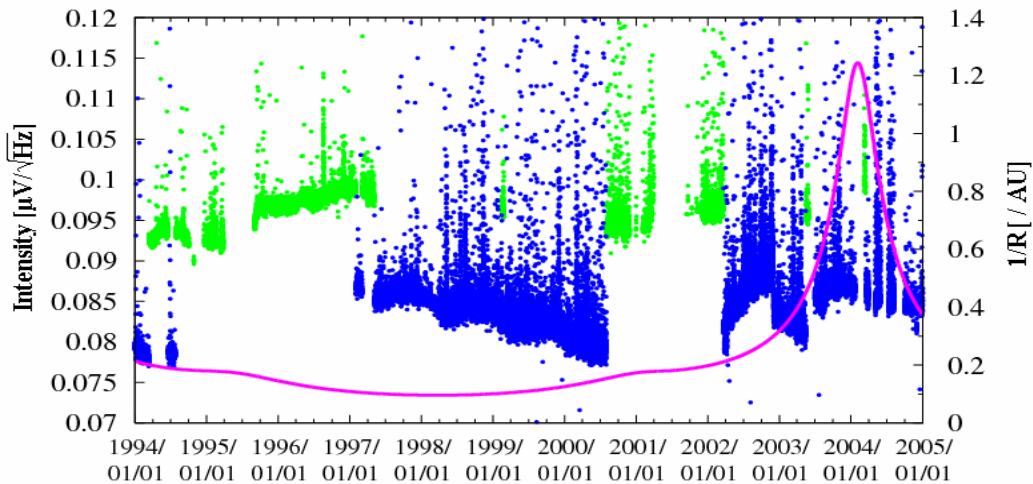


図 5.1 1994 年から 2004 年の間に Ulysses/URAP によって観測された電界強度。telemetry の bit rate の mode は mode3 の時のデータのみを示している。●、●は電界強度  $[\mu \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}]$  を示し、桃色の線が Ulysses と木星との距離の逆数  $[1/\text{AU}]$  を示す。●、●はそれぞれ summation モードが on のときと、off のときを示す。ピンク線は Ulysses と木星の

距離の逆数を示す。

## 5.2 HOM 強度の時間変化による出現特性への影響

Ulysses が高緯度帯を航行していたときと、赤道帯を航行していたときでは時期が異なる。そのために、木星の activity が時間変化したことによって、観測強度に見かけの緯度依存性が生じ、観測結果と Ray tracing が一致しない可能性が考えられる。この検証のため、Galileo データの LT 依存性の検証にも用いた Wind/WAVES のデータを用いて議論を行う。

図 5.2 に 2004 年 1 月－2004 年 5 月に Wind/WAVES で観測された HOM の強度を示す。Ulysses が高緯度帯を航行していた時期は 2003 年 12 月、赤道帯を航行していた時期は 2004 年 5 月である。この時期、太陽 Type III の混入が多く、確認された HOM のデータ点は少なくなっているが、強度は Ulysses が赤道帯を航行していた 5 月にかけて増加傾向で、1.5 倍程度強くなっていることが示された。このことを考慮しても、Ulysses で観測された高緯度帯の HOM と赤道帯の HOM には、なお約 10 倍の強度差があることが予想されるので、強度の時間変化だけから、Ulysses の観測結果と Ray tracing の計算結果の不一致を説明することは出来ないと考えられる。よって、Ulysses で観測された高緯度帯の HOM と赤道帯の HOM の強度差は、木星の activity の変化によって生じたものではないことがわかった。

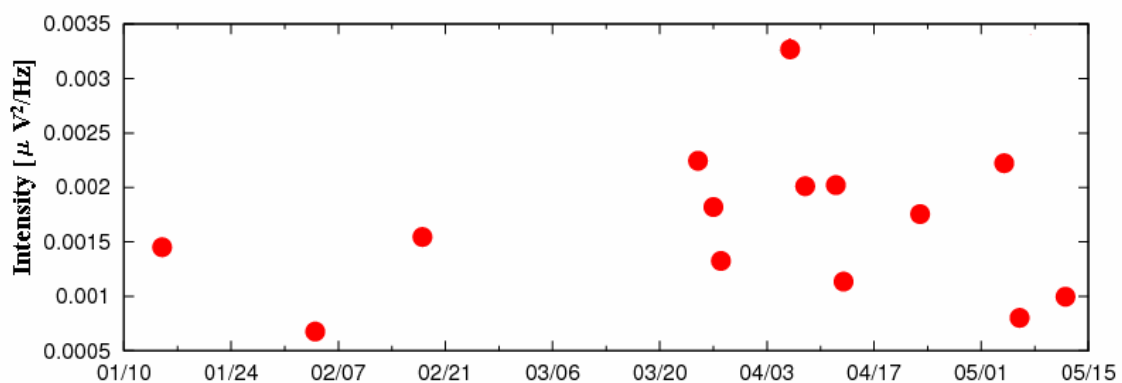


図 5.2 2004 年 1 月－2004 年 5 月に Wind/WAVES で観測された HOM event の電波強度。



## 5.3 放射源の経度方向不均一による出現特性への影響

第3章で述べたように、Galileo/PWS の観測結果から、HOM には LT 依存性があることが示唆された。本節では LT 依存性から考えられる HOM の放射源の不均一性を考察する。

### 5.3.1 LT 依存性からの放射源の推定

図 5.3は第3章でも示したように、Galileo/PWSによって観測されたHOMの強度をGalileoの軌道にプロットすることによってLT依存性を示したものである。これはGalileoがあるLTにいたときに観測したHOMの強度を示すものなので、HOMの放射源自体にLT依存性があるのかどうかは明確ではない。そこで、Ray tracingを用いて、放射源自体がどのような分布であれば観測結果と一致するかを考察する。

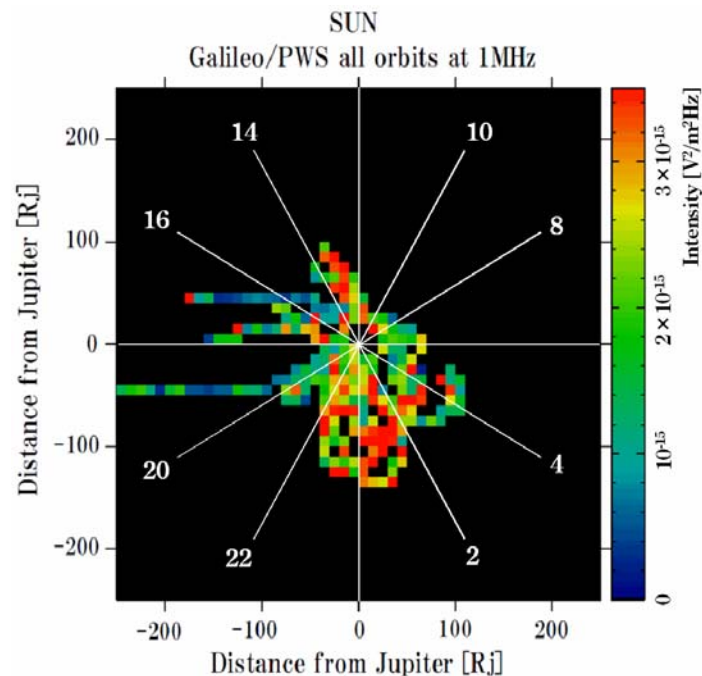


図 5.3 第3章の図 3.7 と同じ図である。1996 年－2002 年にGalileo/PWSで観測された強度をGalileoの軌道にプロットしたもの。カラーは強度 ( $V^2/m^2/Hz$ ) を示す。木星を北から見下ろした図。白い数字はLTを表す。

図 5.4に 2001 年 1 月 2 日、3 日にGalileo/PWSで観測されたHOMのCMLに対する強度を示す。CML120° 付近とCML300° 付近の 2 箇所強度のピークが見られる。そこで、この 2 箇所のCMLの範囲に伝播してくるHOMの放射源位置を、Ray tracingを用いて算出した。その結果を図 5.5に示す。横軸が放射源のSystem III経度で、縦軸がRay pathの本数を示す。これは観測された 2 箇所のCMLの範囲に、どこの放射源からのRay pathが多いかを放射源位置のSystem III経度で表したものである。System III経度で 2 箇所に集中しており、Galileo/PWSの観測においてCML120° 付近に伝播するHOMは放射源のSystem III経度も 120° 付近、CML300° 付近に伝播するHOMは放射源のSystem III経度も 300° 付近のものであることを示している。以上より、HOMは等L-shell上に 360° にわたって放射源があるものの、赤道帯においては、観測者（探査機）の正面にある磁力線付近のsourceからの電波を受けやすいということがわかった。したがって、Galileo/PWSの観測結果からLT依存性が示されたが、このことは放射源にも同じようなLT依存性があることを示唆すると考えられる。

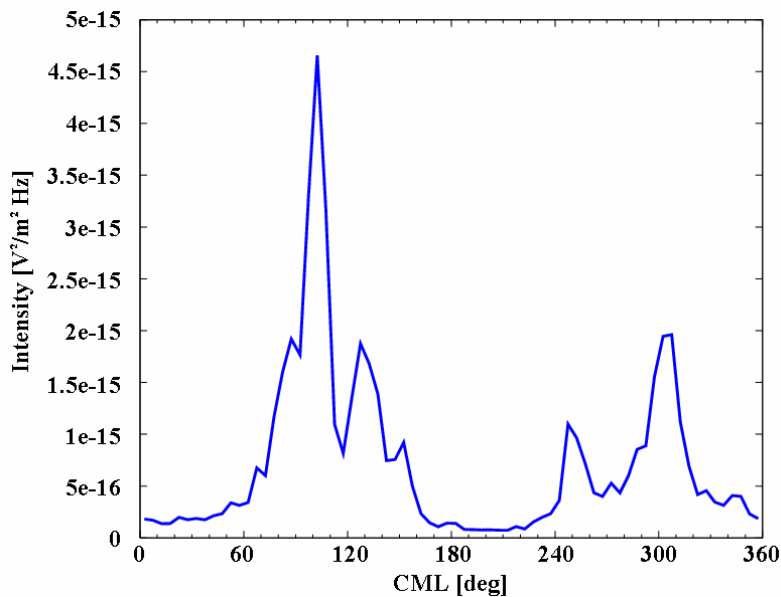


図 5.4 2001 年 1 月 2 日、3 日に Galileo/PWS によって観測された HOM 強度の CML 依存性。強度は 2 日間分のデータの平均値である。2 つの CML で HOM の強度がピークとなっていることがわかる。

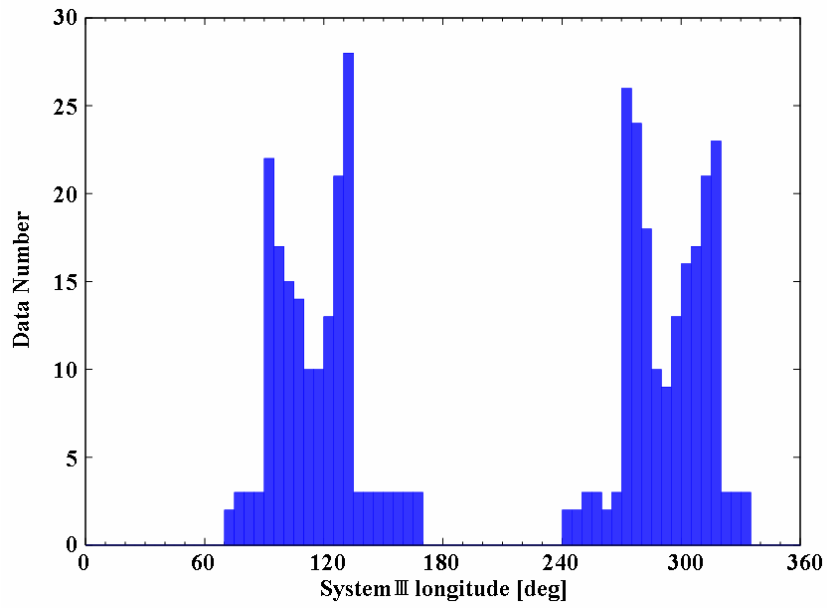


図 5.5 図 5.4において強度がピークとなっているCML120° 付近と、300° 付近に伝播する電波の放射源位置のSystem III経度依存性。放射されたray pathの本数で表す。

### 5.3.2 CML 依存性

次にLTの違いによるCML依存性を考える。図 5.6にGalileoで観測されたHOM強度のCMLとLTに関する強度プロットを示す。第 3 章でも述べたように、Galileoの木星からの距離は  $20R_J$  以遠に制限した。この図を見ると、どのLTに対しても、CML $120^\circ$  付近と  $290^\circ$  付近の 2 箇所で強度が強くなっていることがわかる。これはGalileoの木理緯度が解析期間中ほぼ赤道帯 ( $\pm 1^\circ$ ) であったために、一般に知られているHOMのCML依存性と同様の妥当な結果であると考えられる。しかしながら、LT22h~3hにかけて、CML $0^\circ$  ( $360^\circ$ ) 付近でも強度が強くなっていることが認められる。この成因に関してGalileoの木理緯度、木星からの距離を考慮に入れて考察を行った。

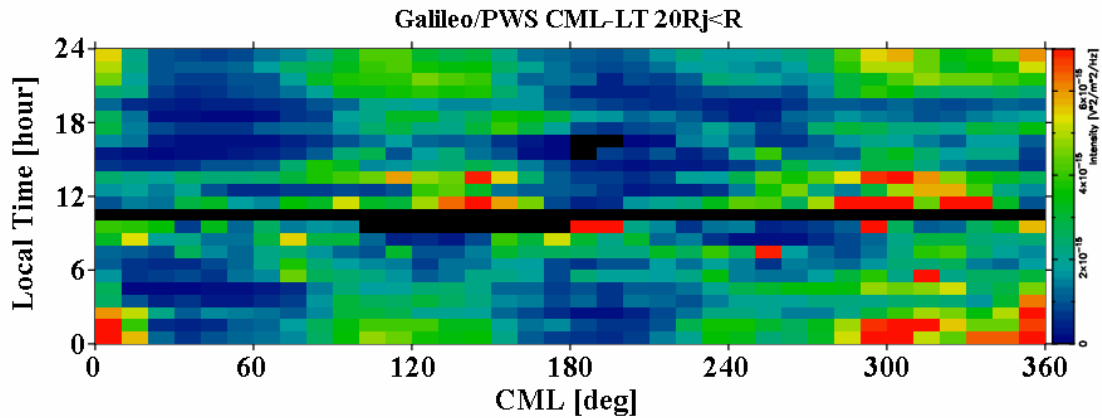


図 5.6 Galileoと木星の距離が  $20R_J$  以遠のときにGalileo/PWSによって観測されたHOMのCMLとLTに関する強度プロット。横軸がCML [deg]、縦軸がLT [hour]を示す。

#### (1) 木理緯度による効果

成因の一つとして考えられることは、Galileoの木理緯度の違いである。第 1 章でも述べたように、HOMには木理緯度の違いによって強度がピークとなるCMLの値が変化するという緯度依存性が存在する。このことを考慮すると、CML $0^\circ$  付近に見られる強度のピークは緯度の違いによるという可能性が考えられる。この検証のため、この解析期間のGalileoのLTと木理緯度の関係を図

5.7に示す。図 5.7より、LT22h～3h付近のGalileoの木理緯度は他のLTにいたときと比べて大きく変わらないことがわかる。よってLT22h～3h付近において、CML0° 付近で強度が強くなっていることはGalileoの木理緯度の違いによるものではないことが示唆された。

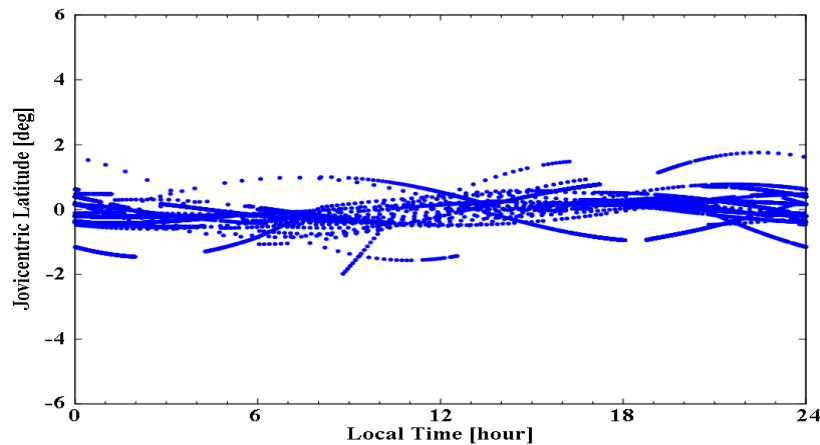


図 5.7 解析期間中の Galileo の LT と木理緯度の変化。Galileo/PWS のデータがあるところのみプロットしている。

## (2) 木星からの距離による効果

次に考えられる成因として、Galileoの木星からの距離の違いがある。木星から探査機までの距離が離れている場合は、探査機と木星との距離の違いは電波の見え方にほとんど影響しないが、Galileoは木星のごく近傍を航行していたために、Galileoと木星との距離の違いが電波の見え方に影響してくると思われる。このため図 5.6は $R > 20R_j$ のデータについてのみ示したものであるが、ここでは改めて距離依存性を考慮する。

図 5.9にCMLとLTに関するHOMの強度プロットを、Galileoの木星からの距離(=Rとする)が  $20 R_j < R < 100 R_j$  と  $100 R_j < R$  に制限したものに分けて示す。また図 5.8に解析期間中のGalileoの木星からの距離のLT依存性を示す。図 5.9の2つの図を見比べてみると、両者ともにLT22h～3h付近において、CML0° 付近で強度が強くなっていることがわかる。このことより、LT22h～3h付近において、CML0° 付近で強度が強くなっていることはGalileoの木星からの距離によるものでもないことが示唆された。

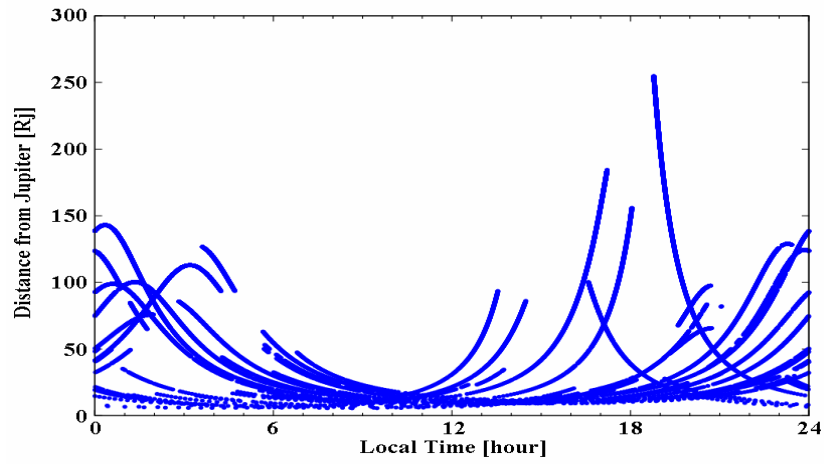


図 5.8 解析期間中のLTに対するGalileoの木星からの距離。図 5.7と同様に、Galileo/PWSのデータがあるところのみプロットしている。

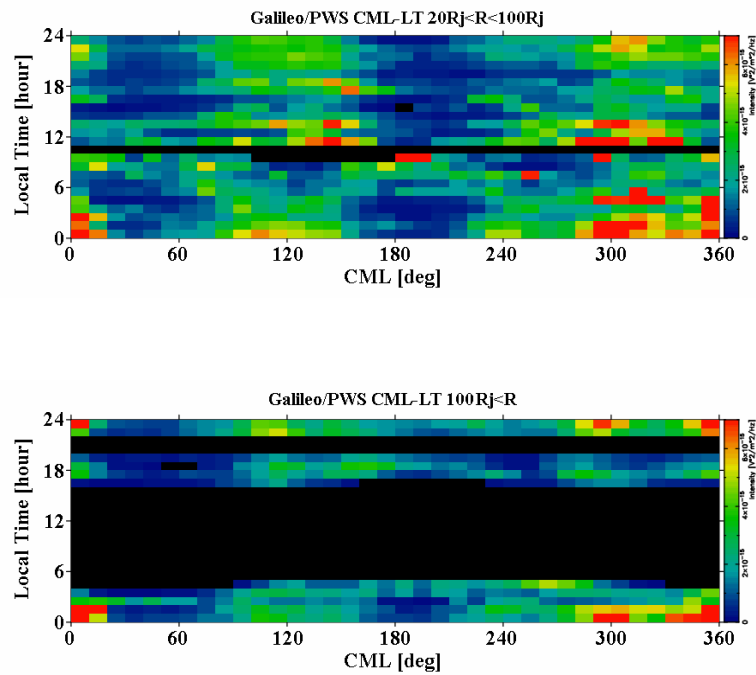


図 5.9 Galileo/PWSによって観測されたHOMのCMLとLTに関する強度プロット。フォーマットは図 5.6と同様である。上図はGalileoが木星からの距離 $R$ が  $20R_j < R < 100R_j$ のときに観測した場合、下図が  $100R_j < R$ のときに観測した場合を表す。

以上の考察より、ほとんどのLTにおいて、HOM強度のCML依存性は変わらないことが示された。しかし、LT22h~3h付近において、CML0°付近で強度が強くなっていることが示され、このことは観測者の木理緯度や木星からの距離によらない、LTに依存した出現特性であることが示唆された。

### 5.3.3 LT依存性の再考・まとめ

以上のHOMのLT依存性の考察より、HOMの放射源自体にLT依存性があり、それはGalileo/PWSの観測結果とあまりかわらず、夜中側の放射源から強い電波が放射されていることによるものであることが示唆された。また、LTの違いにおけるCML依存性については、夜中側において他のLTにおいて見られないCML依存性の存在が示唆された。これらのことから、夜中側に他のLTよりエネルギーの供給のactiveな領域が存在していることを示唆している。

## 5.4 経度方向の不均一性に基づく観測結果の解釈

第4章のRay tracingでは放射源を均一に分布させ、電磁環境や電波のモードの仮定をおき、電波放射に関するパラメータを変化させて計算を行った。パラメータについては現在までのHOMの観測的、理論的研究に基づいて、考えられる条件範囲はすべてカバーできていると考えられる。また、仮定については、電波のモードはR-Xモードとしたが、これは偏波の観測より妥当であると考えられる。磁場モデルについては、放射源の位置から伝播域はダイポール磁場成分が卓越していることもあり、現時点でVIP4モデルを用いることは妥当であると考えられる。プラズマモデルについては、検討に用いたHOMの周波数が伝播過程で $I_0$ プラズマトーラスの影響をほとんど受けない940kHzであるので、プラズマモデルを変えることによる影響はほとんどないと考えられる。これらのことから、パラメータや、仮定の違いによって観測を再現できていないというわけではないことが考えられる。

また、5.2節よりHOMの放射そのもののactivityの変化によるものではないということも示された。以上から、一つの可能性としてRay tracingの計算で初期条件とした、放射源を均一とした仮定に現実の放射とのずれがあることが考え

られる。加えて5.3節に述べたように、Galileo/PWSの観測結果から、放射源にLT依存性があることが示唆されている。これらの結果を踏まえ、本節では放射源の経度方向の不均一性を考慮した。Ray tracing解析を行い、観測結果と再度比較することによってHOMの放射起源を考察する。

#### 5.4.1 木星オーロラとの比較

経度方向の放射源の不均一性について考えるにあたり、HOM現象と正の相関をもつことが予想される木星オーロラ現象に着目する。*Grodent et al. [2003]*によると、磁気LT (MLT) による木星紫外線オーロラの発光強度依存性が報告されている (図 5.10)。図 5.10はオーロラのメインオーバル上のある固定した領域におけるオーロラの発光強度を示している。上図の領域は自転軸と磁軸と対象領域が直線上にあり $MLT=LT$ となっている。また下図は自転軸と磁軸と対象領域が直線上にはないことを考慮し、MLTをLTに変換すると、 $MLT14h=LT10h$ 、 $MLT22h=LT19h$ となっている。以上を考慮すると、オーロラ発光は朝側で弱く、昼側から夕方にかけて強くなり、夕方から夜側にかけてまた弱くなる傾向が見てとれる。



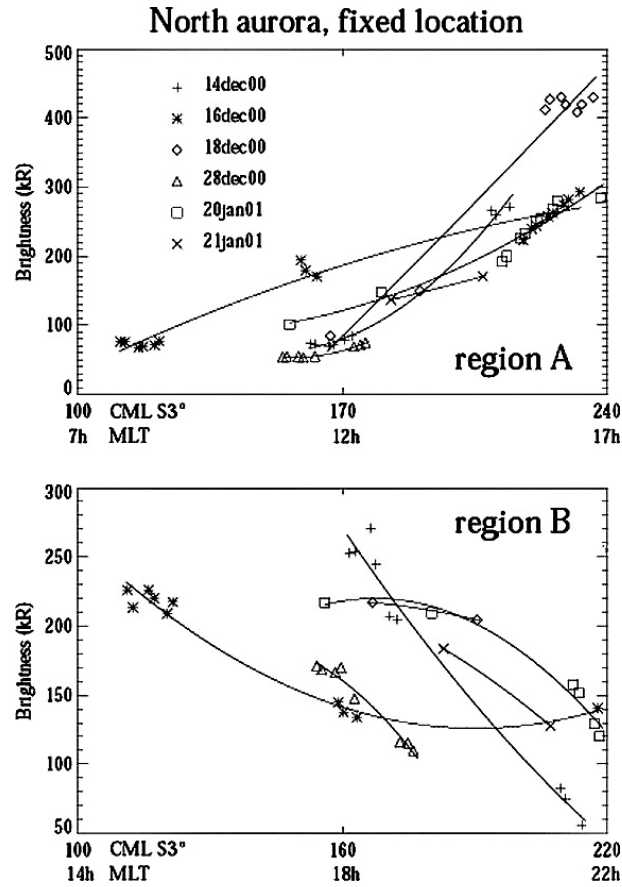


図 5.10 上図は木星オーロラのメインオーバル上のある固定した領域 A、下図は領域 A と同様に、ある固定した領域 B における磁気 LT に対する木星オーロラの発光強度。記号の違いはオーロラを観測した日にちの違いである[Grodent et al., 2003]。

## 5.4.2 Ray tracing の再考察

5.4.1節で述べたオーロラの発光強度のMLT依存性に基づき、HOM放射源のLTによって強度差を与えてRay tracingを行う。また、さらなる条件として、5.3節で述べたGalileoの観測から明らかにされたHOM放射源のLT依存性も考慮してRay tracingの再解析を行った。

満たすべき条件は

- (1) 高緯度帯、LT14 h 付近で観測される電波が弱いこと(Ulysses の観測結果より)。
- (2) 赤道面、LT17h 付近の CML 依存性が観測と一致すること(Ulysses の観測結果より)。
- (3) 赤道面、LT14h 付近の CML 依存性が観測と一致すること(Galileo の観測より)。
- (4) 赤道面、LT0h 付近で観測される電波が相対的に強いこと (Galileo の観測より)。

である (表 5.1参照)。

**表 5.1** 探査機の LT、木理緯度とそのときの電波強度の観測結果(Ray tracing で満たすべき条件)。

探査機	Local Time	木理緯度	条件
Ulysses	14h	$65^{\circ} < \text{lat} < 70^{\circ}$	弱い
Ulysses	17h	$0^{\circ} < \text{lat} < 5^{\circ}$	CML 依存性
Galileo	14h	$0^{\circ} < \text{lat} < 5^{\circ}$	CML 依存性
Galileo	0h	$0^{\circ} < \text{lat} < 5^{\circ}$	強い

ここで、Ray tracingのフリーパラメータの設定条件としては、赤道帯においてUlysses/URAPの観測により得られたCML依存性が、Ray tracingの計算によって一番よく再現されていた $L=12$ 、 $\beta=50^{\circ}$ 、 $f/f_{R-X}=1.01$ を用い、放射源の電波強度にLTによる強度差をつけて行った。図 5.11に、この条件のもと計算を行ったRay tracingの計算結果と、Ulysses/URAPによる観測結果を示す。強度がピークとなるCMLは $0^{\circ} < \text{木理緯度} < 5^{\circ}$ 、 $-10^{\circ} < \text{木理緯度} < -5^{\circ}$ の場合で、ともによく合っていることがわかる。

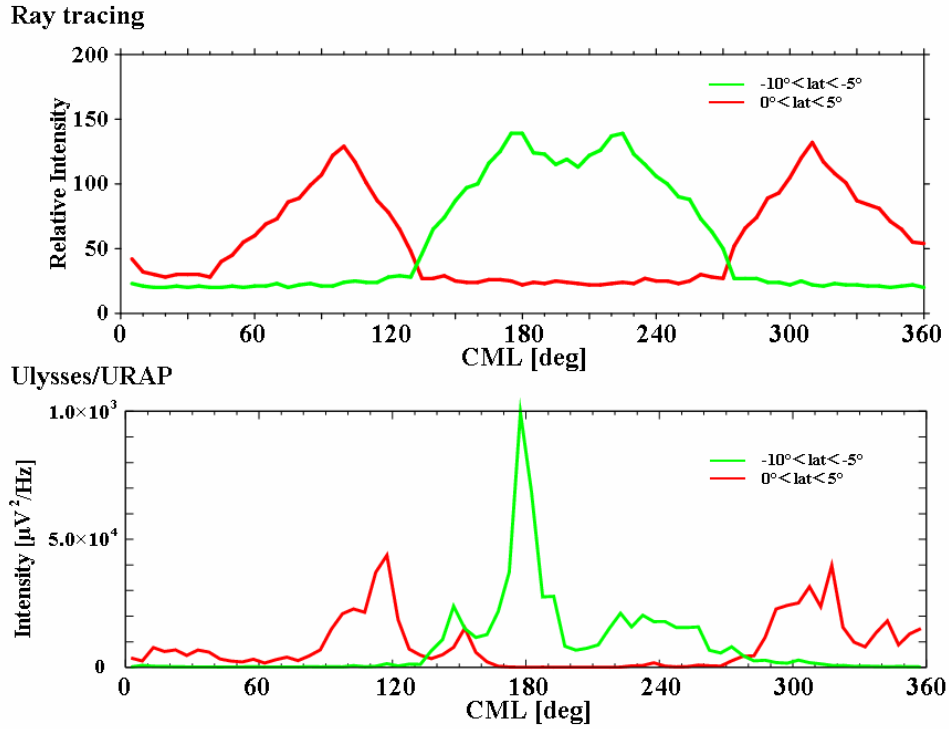


図 5.11 赤道帯 HOM に対しての Ray tracing の計算結果と Ulysses/URAP の観測結果。上図： $L=12$ 、 $\beta=50^\circ$  のときの Ray tracing 計算により得られた CML 依存性。下図：Ulysses/URAP によって観測された HOM の CML 依存性。それぞれ、赤線： $0^\circ < \text{木理緯度} < 5^\circ$ 、緑線： $-10^\circ < \text{木理緯度} < -5^\circ$  を示す。

図 5.11 同様の Ray tracing のフリーパラメータ設定の下、LT によって強度差をつけて行った計算結果を図 5.12 に示す。ここで LT による強度差は LT3～9h と、LT17～23h 付近を弱くした結果である。強度差は 2 倍とした。赤線は Ulysses が高緯度帯を航行していたとき、緑線は Ulysses が赤道帯を航行していたとき、水色線は Ulysses が高緯度帯を航行していたときと同じ LT で赤道帯を Galileo が航行していたとき、青線は Galileo が夜中側を航行していたときにそれぞれ対応する。また、ピンク色の線は Ulysses が高緯度帯を航行していたときで、経度方向に LT 依存性がない一様な強度で放射させた場合を示す。

この結果に対して、表 5.1 で示した条件を満たしているかを考察する。

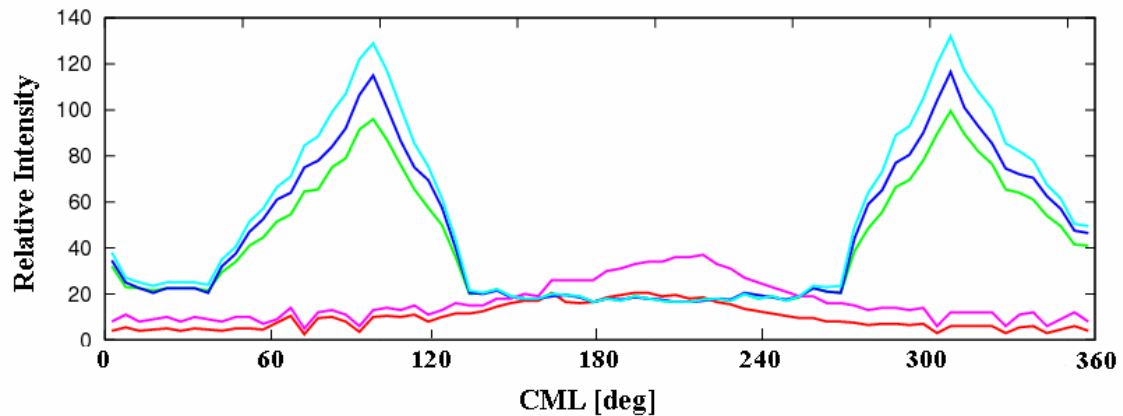


図 5.12 LT による強度差をつけた Ray tracing の計算結果。それぞれ、赤線：Ulysses が高緯度にいたとき (LT=14h、 $65^{\circ} < \text{木理緯度} < 70^{\circ}$ )、緑線：Ulysses が赤道面にいたとき (LT=17h、 $0^{\circ} < \text{木理緯度} < 5^{\circ}$ )、水色線：Ulysses が高緯度にいたときの LT と同じ LT の赤道帯に Galileo がいたとき (LT=14h、 $0^{\circ} < \text{木理緯度} < 5^{\circ}$ )、青線：Galileo が夜中側にいたとき (LT=0h、 $0^{\circ} < \text{木理緯度} < 5^{\circ}$ )、ピンク線：Ulysses が高緯度にいたときで、LT 依存性を付けなかった場合を示す。

### (1) Ulysses の観測結果との比較

第3章で述べたように、Ulysses/URAPの観測結果より、赤道帯以外では微弱、または、ほとんど観測されていないことが示されている。Ulyssesが高緯度帯を航行していたときに相当する計算結果が図 5.12のピンク線(放射源に対してLT依存性なし)と赤線(LT依存性あり)である。LT依存性がない場合は、CML $200^{\circ}$ 付近で強度がピークとなるが、LT依存性を与えた場合はこのピークが低下し、Ulyssesが赤道帯を航行していたときに相当する、緑線の最低レベルと同程度の強度となる。一方、観測結果でも、赤道帯におけるCML依存性の最低レベルは高緯度における強度とほぼ同じ  $1.0 \times 10^{-6} [\mu \text{V}^2/\text{Hz}]$  程度である(第3章、図 3.15、図 3.16 参照)。観測結果ではCML依存性のピークレベルと最低レベルの比は100以上、Ray tracingでは5程度と大きな違いがある。この大きさの違い以外では、放射源のLT依存性の導入により、高緯度帯のCML依存性が弱まる。最低レベルが合致する等、観測結果との適合傾向が認められ、放射源にLT依存性があるとする考え方は支持されると判断される。観測結果とRay tracingの結果で生じているCML依存性のピークと最低レベルの比の差異については5.4.3節で改めて議論する。

## (2) LT=14hにおけるUlyssesとGalileoの観測結果との比較

LT=14hで高緯度帯を航行していたUlyssesに届く電波が弱い場合について、同じLTで赤道面を航行していたGalileoを想定したRay tracingの計算結果と、観測結果を比較する。ここで、LT=14h付近の赤道面を航行していたGalileoの観測結果によるCML依存性を示したものが図 5.13である。この図より、LT=14h付近においても、赤道面で一般に観測されるCML依存性を示していることがわかる。図 5.12において、高緯度に放射されるHOMはLTによる強度差をつけることによって弱められたにもかかわらず、赤道面への電波は全く弱められず(値としてはLT依存性を与えていないときと同じ)、図 5.13に示したようなCML依存性を再現している(図 5.12の水色線)。このことから、LT=14hにおけるUlyssesとGalileoの観測結果をRay tracingによって矛盾なく説明出来るので、放射源にLT依存性があるとする考え方は支持される。

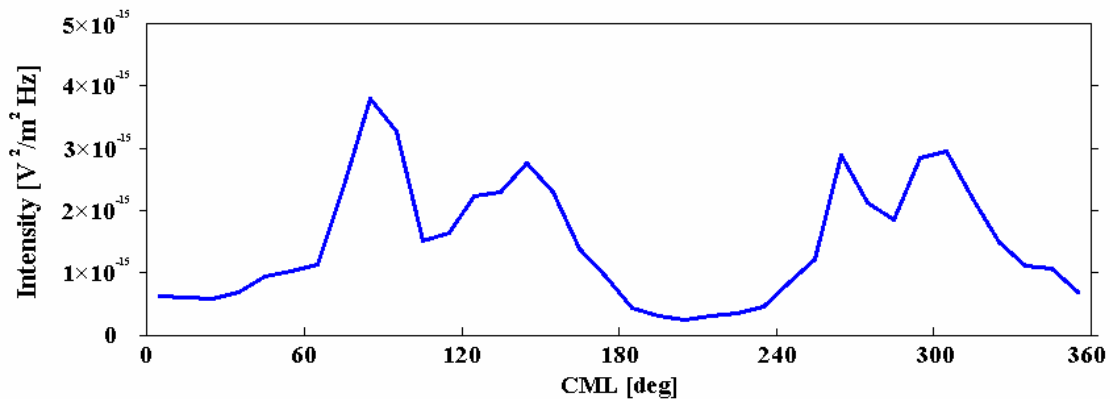


図 5.13 LT=14 付近を航行していた Galileo で観測された HOM 強度の CML 依存性。

## (3) 夜中側におけるGalileoの観測結果

第3章のGalileo/PWSの観測結果より、夜中側ではHOMの強度は強くなっていることが示された。ここで、図 5.12においてGalileoが夜中側を航行していたときの観測結果に相当する青線に着目すると、強度が特に弱くはならず(値とし

てはLT依存性を与えないときと比べて 0.88 倍)、なおかつLTの夜中側を弱くしなくても、Ulysses/URAPが高緯度帯を航行していたLT17hの電波は弱くなったので、夜中側赤道帯におけるGalileoの観測結果とも、放射源にLT依存性があるとする考え方は支持される。

以上より、放射源の電波強度に LT による強度差があると考えた場合、Galileo/PWS、Ulysses/URAP の両観測を満たすような Ray tracing の結果が得られる可能性が示された。

### 5.4.3 強度

5.4.2節で示したように、Ray tracingでは放射源にLTによる強度差をつけることによってUlysses/URAPの観測が行われたLTの高緯度帯における電波の強度が弱くなることがわかった。しかし、第 3 章で述べたように、赤道帯と高緯度帯におけるHOMには観測値では 100 倍以上の強度差があることになる。5.1節において、常に木星電波が観測されている可能性について考察した。その結果、図 5.1に示したように、BG強度は木星からの距離との関係が明瞭ではなく、また、規則性が低い変動が大きく、木星電波以外の雑音混入が大部分を占めていたと考えられるが、常に木星電波が観測されていた可能性を否定する結果ではなかった。受信電波強度にHOMによる成分と、それ以外の雑音成分の切り分けはUlysses/URAPではできないため、仮定の議論となるが、BG強度を、図 5.12で常に電波が受信されることになる相対強度 20 のレベルを観測時にBGレベルと見なしていたとするならば、高緯度帯の強度はBG強度に埋もれてしまい、なおかつ、高緯度帯と赤道帯におけるHOMの強度が 100 倍程度つくことになる。

このような議論からもわかるように、Ulysses/URAP の議論をしていく上では BG 強度の決め方がとても重要なパラメータとなる。そのために、将来惑星電波ミッションでも BG 強度を決めるための機能の搭載が望まれる。

## 5.5 LT 依存性の意義

Galileo、Ulysses の両観測結果に基づく Ray tracing を用いた解析より、HOM 放射源の分布は一樣ではなく、LT 依存性がある可能性が示された。本研究で求めた、観測結果とよく合致していた LT 依存性は LT3~9h と、LT17~23h 付近の放射源の強度が弱い分布であったが、この条件は木星オーロラの発光強度の観測結果と近い傾向を示している。木星オーロラの発光強度と HOM 強度の対応関係を明らかにしていくことは今後の課題であるが、本研究で行ったアプローチを進展させることでこの課題解決の決め手が得られることが期待される。また、地球側からの木星オーロラの観測では、夜側オーロラの情報を得ることは困難であるが、木星電波から得られる LT 依存性の夜側の情報は、木星の夜側オーロラの発光分布、さらには夜側磁気圏の構造やダイナミクスの推定に重要な知見を与えるものとして考えられる。

## 5.6 まとめと今後の課題

本研究では緯度方向、経度方向に広くカバーしている Ulysses と Galileo の観測結果に対する解析、考察を主に行った。その結果、HOM 強度の顕著な経度依存性、LT 依存性の成因は放射源が一樣に分布しているのではなく、LT 依存性があることによるとする可能性が示された。

しかし、Ulysses、Galileo はそれぞれ緯度方向、経度方向に広範囲をカバーし観測を行ったが、どちらの場合も今後考慮されるべき課題が考えられる。Galileo の場合、ある LT 域の観測では Galileo が近木点付近にいたときばかりの観測データ取得が行われていた。木星に近すぎる場所での観測ばかりでは、一般的な HOM の性質が見えにくくなってしまう。そのために、ある程度離れた距離においても広範囲で LT をカバーするような観測の実施も期待される。また、Ulysses の場合、緯度変化を広範囲にカバーしているにもかかわらず、B G 強度を決めることが出来なかったために、HOM の放射起源を決定するために鍵となる正確な強度の議論ができなかった。

本研究でその一端を示したように、経度方向、緯度方向に広く 3 次元的に HOM の放射特性を明らかにすることは HOM の放射起源、さらには HOM の放射そのものをコントロールする木星磁気圏ダイナミクスの解明に重要な情報をもたらすと考えられる。そのために、有用なデータを取得するさらなる観測が

今後期待される。





## 第6章 結論

木星ヘクトメートル電波(HOM)の放射特性は、電波放射メカニズムに関わるとともに、伝搬域のプラズマ環境、また、電波発生域へのエネルギー供給過程をも反映する。よって、HOMの放射特性の解明は、電波発生過程、木星磁気圏環境およびそのダイナミクスを知る上で重要な手がかりになるといえる。この考えの下、HOMの放射起源の解明を目的として、Galileo、Ulyssesによって観測されたHOMの解析、また、Ray tracingを用いて観測結果の解析を行ってきた。

木星近傍 300R<sub>J</sub> 以内を広範囲の Local Time をカバーして航行していた Galileo の電波観測からは、HOMの放射強度の南北差や LT 依存性の情報が得られた。また、 $-20^{\circ} < \text{木理緯度} < 75^{\circ}$  の広範囲の木理緯度をカバーしていた Ulysses の電波観測からは緯度依存性の情報が得られた。

本研究ではこれらの観測結果に基づいて、HOMの放射起源を明らかにするために、ray tracingを用いて考察を行った。ray tracingの計算条件としては、周波数 $f=940\text{kHz}$ のHOMを想定し、放射条件に関する従来の研究を参考にして、電磁波モードとしてはR-Xモードとした。また、磁場モデルはVIP4 モデル (Connerney *et al.*, [1998])、プラズマ密度モデルはDivine and Garrett [1983] を参照して用いた。一方、フリーパラメータとして、放射源の存在する磁力線を特定するためのL値、放射coneの開き角 (cone half-angle) である $\beta$ 、磁力線上の放射位置を特定するための周波数 $f$ とR-Xモードのカットオフ周波数 $f_{R-X}$ の比である $f/f_{R-X}$ を設定した。それぞれ  $8 \leq L \leq 20$ 、 $40^{\circ} \leq \beta \leq 90^{\circ}$ 、 $1.000001 \leq f/f_{R-X} \leq 1.01$  の範囲で変化させて条件を設定し計算を行った。

このように、Galileo/PWS、Ulysses/URAPの観測結果、Ray tracingによる計算結果を総合的に議論した結果は以下の通りである。

- Galileo が木星近傍 (20R<sub>J</sub> 以内) を航行していたときに観測されたデータを用いて HOM 強度の南北依存性を調べた結果、HOM の放射源強度は南北で非対称性をもつことがわかった。しかし、この南北非対称性は

一定でなく、1996年から2002年の間で変化していた。この南北の非対称性は南北半球の電波発生域や伝搬域での磁場・プラズマ環境の差異によるものであると考えられる。しかし、地球オーロラキロメータ放射で認められているような、太陽紫外線照射による極域電離圏の過熱に伴う変化の傾向とは合致せず、HOM 強度の南北非対称性の原因は太陽紫外線照射とは別のプロセスによるものと考えられる。

- Galileo の航行軌道が赤道面内で地方時(LT)方向を広範囲でカバーしていたことに着目し、HOM の LT 依存性についての解析を行った。その結果、HOM の強度は夜中側で強くなっていることがわかった。この結果は先行研究と比べて、HOM の activity の時間変化と分離できている点、Galileo と木星の距離が近い場合に生じる HOM の伝搬特性に起因した強度減少現象と分離できている点でアドバンテージがあり、より明瞭な LT 依存性が得られた。さらに、Ray tracing の解析より、赤道面では観測者（探査機）に対面する磁力線付近の source からの電波を受けやすいことが明らかになり、Galileo の観測から示された HOM 強度の LT 依存性は放射源の LT 依存性を示すことが明らかになった。
- 広範囲の緯度変化( $-20^{\circ} < \text{木理緯度} < 80^{\circ}$ )をする軌道をとった Ulysses で観測された HOM の緯度依存性を解析した結果、HOM は中高緯度帯ではほとんど出現せず、赤道帯( $-10^{\circ} < \text{木理緯度} < 10^{\circ}$ )に集中することが示され、その強度比は 100 倍以上になることが示された。Ray tracing による解析から、放射源が経度方向に一樣に分布しているとする仮定の下では、この観測結果は説明出来ないことがわかった。この結果は HOM の放射源は経度方向に一樣に分布していない可能性を示唆する。
- Grodent *et al.* [2003]により示された木星紫外線オーロラの発光強度の MLT 依存性と、Galileo の観測から明らかにされた HOM 放射源の LT 依存性も考慮して、HOM の放射源に経度方向の非一樣を仮定し Ray tracing の再解析を行った。その結果、LT3~9h と、LT17~23h 付近の HOM 放射源について、それ以外の放射源との強度比を 1/2 にすると、Galileo/PWS で観測された LT 依存性、及び、Ulysses/URAP で観測された緯度依存性を満たす可能性が示された。しかし、この場合でも、赤道域と高緯度域で観測された HOM の大きな強度比は説明できない。一つの解釈としては、Ray tracing の結果から、HOM は赤道から高緯度に限なく放射されていることが予想され、このために Ulysses では、HOM

は背景雑音と分別されずに解析され、結果として赤道域と高緯度で大きな見掛けの強度比が生じたことが考えられる。

以上より、本研究では観測領域として緯度方向、経度方向を広くカバーしている *Ulysses* と *Galileo* の観測から、**HOM** 強度の顕著な緯度依存性、**LT** 依存性を明らかにした。さらに、**Ray tracing** 解析からこの特性の成因は放射源に **LT** 依存性があることによる可能性を示した。ただし、この解釈と成立として、赤道から高緯度で広く観測されるべき弱い **HOM** の存在が予想された。

**HOM** の放射起源に関するこれらの解釈の妥当性を検証するには、*Ulysses*/*URAP* では成しえなかった、**BG** と自然電波の分別が将来の電波探査で行われることがまず期待される。また、*Galileo* では十分成しえなかった、**HOM** 出現の距離依存性が生じないような距離( $R > 20R_J$ )でのより広範囲な **LT** での **HOM** 出現特性の導出も期待される。このように、より有用なデータを取得するさらなる観測が **HOM** の放射起源、さらには **HOM** の放射そのものをコントロールする木星磁気圏ダイナミクスの解明につながるものと考えられる。



# 謝辞

研究を始めて2年半の月日が経ちました。その中で、多くの皆様から研究面、生活面において多大なるご支援をいただきました。そして今日ここに、2年半の積み重ねである修士論文を完成させることができました。この場を借りて皆様に感謝の気持ちを述べさせていただきます。

指導教員である三澤浩昭准教授はどんなに研究に行き詰まっているときでも、かなりの時間を割いていただき、解決の糸口を一緒に探してくださいました。私がここに修士論文を完成させることができたのも、常に丁寧にやさしく指導してくださいました三澤准教授がいたからこそだと思っております。深く御礼申し上げます。

土屋史紀助教には研究面での相談のほかに、基本的な計算機の使い方から、生活面に至るまで、すべてのことにおいて大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。そして、森岡昭名誉教授からはPPARCセミナー、電波ミーティングを通して数多くの大変有意なご意見を頂きました。心より感謝いたします。

岡野章一教授、坂野井健助教からはPPARCセミナーを通じて、たくさんのご助言をいただきました。視点の異なったご意見に気づかされることも多かったです。深く感謝いたします。

小野高幸教授、笠羽康正教授、飯島雅英准教授、村田功准教授、高橋幸弘講師の先生方にはC領域セミナーを通じて、大変有益なご助言をいただき、その後の研究に役立たせていただきました。心より御礼申し上げます。

そして本研究では様々な探査機の観測データを使用させていただきました。Galileo/PWSのデータはNASAのPlanetary Data Systemより取得いたしました。Galileo/PWSチームの方々に深く感謝いたします。Ulysses/URAPのデータはESAのUlysses Data Systemより取得いたしました。Ulysses/URAPのチームの方々に深く感謝いたします。Wind/WAVESのデータはNASA/GFSC Wind/WAVESチームの方々に深く感謝いたします。

鍵谷将人博士、加藤雄人博士、山田学博士の方々からは PPARC セミナーを通して的確なアドバイスをしていただきました。心よりお礼申し上げます。

秘書の佐藤麻里子さん、技官の小岩綾さん、阿部利弘研究推進員には PPARC の環境を整えていただき非常に過ごしやすい環境の中研究を行うことが出来ました。深く感謝致します。そして技術捕の稲垣律子さんとはお昼ご飯をご一緒させていただきながら、色々な話をさせていただき、大変心和むひと時を過ごさせていただきました。心よりお礼申し上げます。

小淵保幸さん、野村詩穂さん、今井浩太さんの先輩方には研究に対するたくさんの励ましを頂きました。深く感謝致します。

木村哲士さんは修士論文作成にあたり多大なるお力添えをいただきました。深く御礼申し上げます。木村智樹さんからは研究内容が似ていることもあり、数々の研究に対するアドバイスをしていただき、さらには計算機に対する知識も増やしていただきました。厚く御礼申し上げます。田所裕康さんはまだ PPARC の生活に馴染めていなかった私を気にかけてくれ、PPARC という場所を過ごしやすい場所にしてくれました。心から感謝致します。

学部4年の頃から一緒である米田瑞生君には、研究の相談にのってもらったり、息抜きのお場をつくってもらったりと頼りっぱなしの3年間でした。心から感謝しております。そして藤井慎二くんは2年間でしたが、ともに励ましあい成長することが出来たと思っております。深く感謝いたします。

そして、修士1年、学部4年生の方々の炊き出しには大変お世話になり、本修士論文作成にあたっては、木村哲士さん、岩井一正君、西山尚典君をはじめとして、大変多くの方々に多大なるご支援を頂きました。深く感謝しています。

このように多くの方々に支えられて送ってきた研究室での生活は、生涯忘れることのない大切な思い出です。

そして最後に、仙台での6年間の生活を応援し続けてくれた両親、リラックスできる環境をつくってくれた妹、友人たちに心より感謝して、謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- Alexander, J. K., M. D. Desch, M. L. Kaiser, and J. R. Thieman, Latitudinal beaming of Jupiter's low frequency radio emissions, *J. Geophys. Res.*, **84**, 5167-5174, 1979.
- Barrow, C. H., and M. D. Desch, Solar wind control of Jupiter's hectometric radio emission, *Astron. and Astrophys.*, **213**, 495-501, 1989.
- Bougeret, J.-L., M. L. Kaiser, P. J. Kellogg, R. Manning, K. Goetz, S. J. Monson, N. Monge, L. Friel, C. A. Meetre, C. Perche, L. Sitruk, and S. Hoang, Waves: The Radio and Plasma Wave Investigation on the Wind Spacecraft, *Space Sci. Rev.*, **71**, 231-263, 1995.
- Brice, N. M., and T. R. McDonough, Jupiter's radiation belts, *Icarus*, **18**, 206-219, 1973.
- Brown, L. W., Spectral behavior of Jupiter near 1 MHz, *Astrophys. J.*, **194**, 159-162, 1974.
- Burke, B. F., and K. L. Franklin, Observations of a Variable Radio Source Associated with the Planet Jupiter, *J. Geophys. Res.*, **60**, 213-217, 1955.
- Connerny, J. E. P., M. H. Acuna, N. F. Ness, and T. Satoh, New models of Jupiter's magnetic field constrained by the Io flux tube footprint, *J. Geophys. Res.*, **103**, 11929-11940, 1998.
- Desch, M. D., and C. H. Barrow, Direct evidence for solar wind control of Jupiter's hectometer-wavelength radio emission, *J. Geophys. Res.*, **89**, 6819-6823, 1984.



Desch, M. D., and T. D. Carr, Dekametric and hectometric observations of Jupiter from the RAE-1 satellite, *Astrophys. J.*, **194**, 57-59, 1974.

Divine, N., and H. B. Garrett, Charged particle distributions in Jupiter's magnetosphere , *J. Geophys. Res.*, **88**, 6889-6903, 1983.

Gallagher, D. L., and N. D'Angelo, Correlations between solar wind parameters and auroral kilometric radiation intensity, *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 1087-1089, 1981.

Grodent, D., J. T. Clarke, J. Kim, J. H. Waite, and S. W. Cowley, Jupiter's main auroral oval observed with HST-STIS, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi: 10.1029/2003JA009921, 2003.

Gurnett, D. A., W. S. Kurth, R. R. Shaw, A. Roux, R. Gendrin, C. F. Kennel, F. L. Scarf, and S. D. Shawhan, The Galileo plasma wave investigation, *Space Sci. Rev.*, **60**, 341-355, 1992.

Gurnett, D. A., W. S. Kurth, J. D. Menietti, and A. M. Persoon, An unusual rotationally modulated attenuation band in the Jovian hectometric radio emission spectrum, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1841-1844, 1998.

Gurnett, D. A., W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, A. M. Persoon, P. Zarka, A. Lecacheux, S. J. Bolton, M. D. Desch, W. M. Farrell, M. L. Kaiser, H. P. Ladreiter, H. O. Rucker, P. Galopeau, P. Louarn, D. T. Young, W. R. Pryor, and M. K. Dougherty, Control of Jupiter's radio emission and aurorae by the solar wind, *Nature*, **415**, 985-987, 2002.

Higgins, C. A., J. R. Thieman, S. F. Fung, J. L. Green, and R. M. Candey, Structure within Jovian hectometric radiation, *J. Geophys. Res.*, **100**, 19487-19496, 1995.

Higgins, C. A., J. R. Thieman, S. F. Fung, J. L. Green, and R. M. Candey, Jovian Dual-Sinusoidal HOM lane features observed by Galileo, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 389-392, 1999.

Higgins, C. A., J. R. Thieman, S. F. Fung, J. L. Green, and R. M. Candey, Simple ray of Galileo-observed hectometric attenuation features, *Radio Science*, **36**, 1713-1721, 2001.

- Higgins, C. A., J. D. Menietti, and I. W. Christopher, Europa control of Jovian radio emission: A Galileo study, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14110, 2006.
- Kaiser, M. L. , A low-frequency radio survey of the planets with RAE 2, *J. Geophys. Res.*, **82**, 1256-1260, 1977.
- Kaiser, M. L. , Time-variable magnetospheric radio emissions from Jupiter, *J. Geophys. Res.*, **98**, 18757-18765, 1993.
- Kaiser, M. L., and M. D. Desch, Narrow-band Jovian kilometric radiation - A new radio component, *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 389-392, 1980.
- Kumamoto, A., T. Ono, M. Iizima, and H. Oya, Seasonal and solar cycle variations of the vertical distribution of the occurrence probability of auroral kilometric radiation sources and of upflowing ion events, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi: 10.1029/2002JA009522, 2003.
- Ladreitner, H. P., and Y. Leblanc, Jovian hectometric radiation: beaming, source extension, and solar wind control, *Astron. and Astrophys.*, **226**, 297-310, 1989.
- Ladreitner, H. P., and Y. Leblanc, Source characteristics and locations of hectometric radio emissions from the northern Jovian hemisphere, *J. Geophys. Res.*, **95** 9423-9435, 1990a.
- Ladreitner, H. P., and Y. Leblanc, Source characteristics and locations of hectometric radio emissions, *Ann. Geophys.*, **8** 477-488, 1990b.
- Ladreitner, H. P., P. Zarka, and A. Lacacheux, Direction finding study of Jovian hectometric and broadband kilometric radio emissions: Evidence for their auroral origin, *Planet. Space Sci.*, **42**, 919-931, 1994.
- Menietti, J. D., D. A. Gurnett, W. S. Kurth, and J. B. Groene, Control of Jovian radio emission by Ganymede, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4281-4284, 1998.
- Menietti, J. D., D. A. Gurnett, W. S. Kurth, and J. B. Groene, Local time dependence of Jovian radio emissions observed by Galileo, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 569-572,

1999.

Menietti, J. D., D. A. Gurnett, and I. Christopher, Control of jovian radio emission by Callisto, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3047-3050, 2001a.

Menietti, J. D., D. A. Gurnett, J. R. Spencer, and J. A. Stansberry, Relationship between Jovian hectometric attenuation lanes and Io volcanic activity, *Radio Science*, **36**, 1723-1731, 2001b.

Ortega-Molina, A., and A. Lecacheux, Polarization of Jovian hectometric emission, *J. Geophys. Res.*, **96**, 11,441-11,453, 1991.

Rabl, G. K. F., C. H. Barrow, and H. O. Rucker, Solar wind dependence of the Jovian hectometric radio emission –Comparison between Voyager 1 and 2 observations, *Astron. and Astrophys.*, **232**, 242-250, 1990.

Reiner, M. J., Fainberg, and R. G. Stone, Source characteristics of Jovian hectometric radio emissions from the northern Jovian hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 321-324, 1993a.

Reiner, M. J., Fainberg, and R. G. Stone, Source characteristics of Jovian hectometric radio emissions, *J. Geophys. Res.*, **98**, 18767-18777, 1993b.

Sloanaker, M. R., Apparent temperature of Jupiter at a wave length of 10 cm, *Astrophys. J.*, **64**, 346-346, 1959.

Stone, R. G., J. L. Bougeret, J. Caldwell, P. Canu, Y. de Conchy, N. Cornilleau-Wehrlin, M. D. Desch, J. Fainberg, K. Goetz, and M. L. Goldstein, The Unified Radio and Plasma wave investigation, *Astron. and Astrophys.*, **92**, 291-316, 1992.

Warwick, J. W., J. B. Pearce, A. C. Riddle, J. K. Alexander, M. D. Desch, M. L. Kaiser, J. R. Thieman, T. D. Carr, S. Gulkis, A. Boischot, C. C. Harvey, and B. M. Pedersen, Voyager 1 planetary radio astronomy observations near Jupiter, *Science*, **204**, 995-998, 1979.

Wu, C. S., and L. C. Lee, A theory of the terrestrial kilometric radiation, *Astrophys. J.*,

230, 621-626, 1979.

Zarka, P, Radio Emissions from the Planets and their Moons, in *Radio Astronomy at Long Wavelengths*, G. R. Stone (ed.), AGU, 167-178, 2000.

Zarka, P., J. Queinnec, and F. J. Crary, Low-frequency limit of Jovian radio emissions and implications on source locations and Io plasma wake, *Planet. Space Sci.*, **49**, 1137-1149, 2001.

中川史丸, 木星ヘクトメータ電波の放射源特性に関する研究, 博士論文 (東北大学大学院), 2001.

NASA Planetary Data System <http://pds.jpl.nasa.gov/>

ESA Ulysses Data System [http://helio.estec.esa.nl/ulysses/data\\_archive.html](http://helio.estec.esa.nl/ulysses/data_archive.html)

NASA GFSC <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/>

<http://www.sondasespaciales.com/>

<http://ulysses.jpl.nasa.gov/spacecraft/index.html>

<http://pwg.gsfc.nasa.gov/wind.shtml>

<http://helio.esa.int/Ulysses/archive>

<http://pwg.gsfc.nasa.gov/>

[http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/miscellaneous/planetary/other/impact/earth\\_jupiter\\_magnetosphere.jpg](http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/miscellaneous/planetary/other/impact/earth_jupiter_magnetosphere.jpg)